

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## **Numerické modelování obtékání klapky**

## **Numerical Modelling of the Flow over the Flap Valve**

Student:

Bc. Jiří Kukelka

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Ostrava

2013

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Kukelka**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: Numerické modelování obtékání klapky  
Numerical Modelling of the Flow over the Flap Valve

### Zásady pro vypracování:

1. Popište funkci, princip činnosti a hlavní konstrukční části zpětné klapky
2. Proved'te základní rozbor úlohy a definici matematického modelu
3. Připravte geometrii modelu a výpočetní síť
4. Proved'te numerické modelování 3D úlohy pro různý úhel otevření talíře klapky
5. Porovnejte výsledky stacionární a časově závislé úlohy
6. Sestrojte ztrátovou charakteristiku klapky v rozsahu uvažovaných úhlů otevření
7. Proved'te zhodnocení úlohy a porovnání s dostupnými výsledky měření.

### Seznam doporučené odborné literatury:

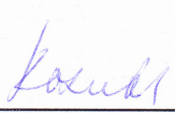
1. ROČEK, J. *Průmyslové armatury* - Vyd.1. Praha: Informatorium, 2002. 253 s. ISBN 80-7333-000-8
2. KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*,. VŠB-TU Ostrava, 2008. [online]. Datum poslední revize 12. 12. 2008. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
3. BOJKO, M.: *3D proudění - Ansys Fluent*. Učební text, VŠB-TU Ostrava, 2012. 314 s. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>.
4. ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
5. BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2 část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online], Datum poslední revize 11. 11. 2004. Dostupné z <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>
6. FLUENT: FLUENT 12 - *User's guide*. Fluent Inc. Dostupné z <<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/ug/node1.htm>>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 17. 5. 2013



.....

Jiří Kukelka

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se úplně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 17. 5. 2013



Podpis

Jiří Kukelka  
A.Dvořáka 709  
Studénka, 74213

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

KUKELKA, Jiří. *Numerické modelování obtékání klapky: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2013, 69 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním obtékání klapky v prostředí programu Fluent. První část je věnována popisu zpětných klapek a jejich činnosti, hlavním konstrukčním částem a typům zpětných klapek. Druhá část je věnována základnímu matematickému modelu programu Fluent a okrajovým podmínkám, které byly použity při výpočtech. Třetí část se zabývá tvorbou trojrozměrné geometrie a jejím přenosem do programu Fluent a následné tvorbě sítě. Popis a nastavení okrajových parametrů výpočtů je uveden ve čtvrté části. Pátá část je věnována grafickému vyhodnocení numerických výpočtů pro různé úlohy. Poslední část je věnována celkovému zhodnocení výsledků.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

KUKELKA, Jiří. *Numerical Modelling of the Flow over the Flap Valve: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Systems, 2013, 69 p. Thesis Head: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

The Master Thesis deals with numerical modelling of the flow over the flap valve with Ansys Fluent Software. The first part is devoted to an introduction to the theory of flap valve. The second part is devoted to the basic mathematical model of the Fluent software and boundary conditions that were used in the calculations. The third part deals with the creation of three-dimensional geometry and transmission to the Fluent software and subsequently meshing. Description of a set of boundary conditions of calculation is given in the fourth section. Fifth part is devoted to graphical evaluation of numerical calculations for various tasks. The final evaluation of the problem solution is described in the conclusion in chapter 6.

## OBSAH

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	5
ANNOTATION OF MASTER THESIS .....	5
OBSAH .....	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....	8
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZPĚTNÝCH KLAPEK .....	10
1.1 Funkce a princip činnosti zpětných armatur .....	10
1.2 Průtok zpětnou klapkou a působení momentů sil .....	11
1.3 Hlavní konstrukční části zpětných klapek .....	14
1.4 Typy zpětných klapek .....	15
1.5 Současný přístup řešení zpětných klapek .....	17
1.5.1 Experimentální metoda .....	17
1.5.2 Numerická metoda .....	18
1.5.3 Srovnání Experimentální a Numerické metody .....	18
2. DEFINICE MATEMATICKÉHO MODELU .....	19
2.1 Ansys Fluent – Integrace pomocí metody konečných objemů .....	20
2.2 Matematické modelování turbulentního proudění - metody .....	21
2.2.1 Dvourovnicový k- $\epsilon$ model .....	22
2.2.2 Dvourovnicový k- $\omega$ model .....	24
2.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	25
3. TVORBA 3D GEOMETRIE A VÝPOČETNÍ SÍŤ .....	26
3.1 Tvorba geometrie v programu Design Modeler .....	27
3.2 Vytvoření výpočetní sítě .....	29
3.2.1 Vytvoření výpočetní sítě vstupního a výstupního objemu potrubí .....	29
3.2.2 Vytvoření výpočetní sítě objemu tělesa klapky a kolem talíře klapky .....	30
3.3 Pojmenování ploch objemů .....	32
4. NUMERICKÝ VÝPOČET V PROGRAMU ANSYS FLUENT .....	33
4.1 Nastavení výpočetních parametrů .....	33
4.1.1 Nastavení okrajové podmínky Pressure-Inlet .....	34
4.1.2 Nastavení okrajové podmínky Mass-Flow-Inlet .....	35
4.1.3 Nastavení okrajové podmínky Outflow .....	35
4.1.4 Nastavení ostatních parametrů .....	35
4.2 Vyhodnocení výpočtů .....	36
5. GRAFICKÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ .....	38
5.1 Grafické výsledky proudění .....	38
5.1.1 Grafické výsledky proudění pro úhel otevření 35° a metodu k- $\epsilon$ standard ..	38
5.1.2 Grafické výsledky proudění pro úhel otevření 35° a metodu k- $\omega$ standard ..	42
5.2 Závislost ztrátového součinitele na úhlu otevření talíře klapky .....	45

5.2.1 Srovnání ztrátových součinitelů dle jednotlivých tlaků .....	50
5.3 Vyhodnocení sil působících na talíř zpětné klapky .....	51
5.4 Porovnání stacionární a časově závislé úlohy .....	53
5.4.1. Grafické porovnání stacionární a časově závislé úlohy .....	55
5.5 Modelování proudění páry .....	58
6. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ.....	65
7. SEZNAM PŘÍLOH .....	67
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	68

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

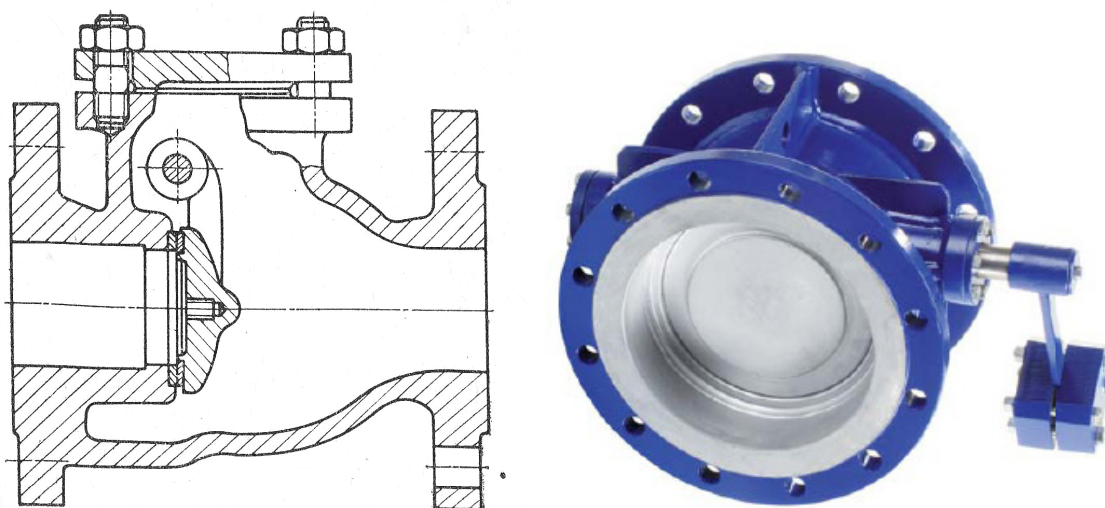
$E$	Celková energie	[J]
$F_x$	Složka síly	[N]
$F_{xyz}$	Výslednice sil	[N]
$F_y$	Složka síly	[N]
$F_z$	Složka síly	[N]
$G_k$	Produkce kinetické turbulentní energie	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$G_\omega$	Produkce disipace $\omega$	[kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$L_1$	Délka	[m]
$L_2$	Délka	[m]
$M_v$	Moment síly	[N.m]
$M_h$	Moment síly	[N.m]
$M_s$	Moment síly	[N.m]
$Q_m$	Hmotnostní průtok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$Q_v$	Objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$R$	Hodnota spolehlivosti	[-]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$S$	Charakteristická plocha průřezu	[m <sup>2</sup> ]
$S_k$	Zdrojový člen	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$S_\omega$	Zdrojový člen	[kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$T$	Teplota	[K]
$Y_k$	Disipace $k$ v důsledku turbulence	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-3</sup>
$Y_\omega$	Disipace $\omega$ v důsledku turbulence	[kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$c_p$	Měrné teplo	[J.kg.K <sup>-1</sup> ]
$d$	Charakteristický rozměr (průměr)	[m]
$f_x$	Složka vnější objemové síly	[N]
$f_y$	Složka vnější objemové síly	[N]
$f_z$	Složka vnější objemové síly	[N]
$k$	Turbulentní energie	[ ]
$l$	Délkové měřítko	[m]
$p$	Tlak	[Pa]
$\Delta p$	Tlakový spád	[Pa]
$\Delta p_{ZSTAT}$	Tlaková ztráta statického tlaku	[Pa]
$\Delta p_{ZTOT}$	Tlaková ztráta celkového tlaku	[Pa]
$t$	Teplota	[°C]
$u$	Rychlostní měřítko	[m.s <sup>-1</sup> ]



$v$	Rychlost proudění	$[\text{m.s}^{-1}]$
$\xi$	Ztrátový součinitel	$[-]$
$\Gamma_K$	Efektivní difuzivita $k$	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
$\Gamma_\omega$	Efektivní difuzivita $\omega$	$[\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}]$
$\alpha$	Úhel otevření	$[\text{°}]$
$\alpha$	Teplotní vodivost	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
$\beta$	Úhel otevření	$[\text{°}]$
$\varepsilon$	Rychlost disipace	$[\text{m.s}^{-1}]$
$\varepsilon_Z$	Ztrátový součinitel	$[-]$
$\lambda$	Součinitel molekulové tepelné vodivosti	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
$\lambda_t$	Součinitel turbulentní teplotní vodivosti	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
$\eta$	Dynamická viskozita	$[\text{Pa.s}]$
$\nu$	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
$\omega$	Poměr disipace	$[\text{s}^{-1}]$
$\sigma_k$	Prandtlovo turbulentní číslo	$[-]$
$\rho$	Hustota kapaliny	$[\text{kg.m}^{-3}]$
$\tau$	Tečné (smykové) napětí	$[\text{Pa}]$

# 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZPĚTNÝCH KLAPEK

Zpětné armatury zabraňují zpětnému průtoku pracovní látky. Jejich funkce je plně automatická a je řízena silovými účinky pracovní látky na vlastní uzávěr a jeho tíhou. Hlavním rozdílem oproti ostatním armaturám je to, že zpětné armatury viz obr. 1.1 pracují samočinně, tj. jejich funkční mechanismus je současně čidlem (zdrojem) pro zahájení funkce, pohonem a vlastním orgánem vykazujícím funkci. Všechny tyto činnosti jsou řešeny velmi jednoduchým způsobem, ovšem nemusí být velmi jednoduché a mohou být nejnáze vyšetřeny a optimalizovány měřením. U zpětných armatur má jejich montážní poloha výrazný vliv na funkci a vlastnosti armatury. Vzhledem k tomu, že u každé konstrukce se tento vliv projeví jinak, je třeba se řídit pokyny výrobce k danému řešení. [2], [3]



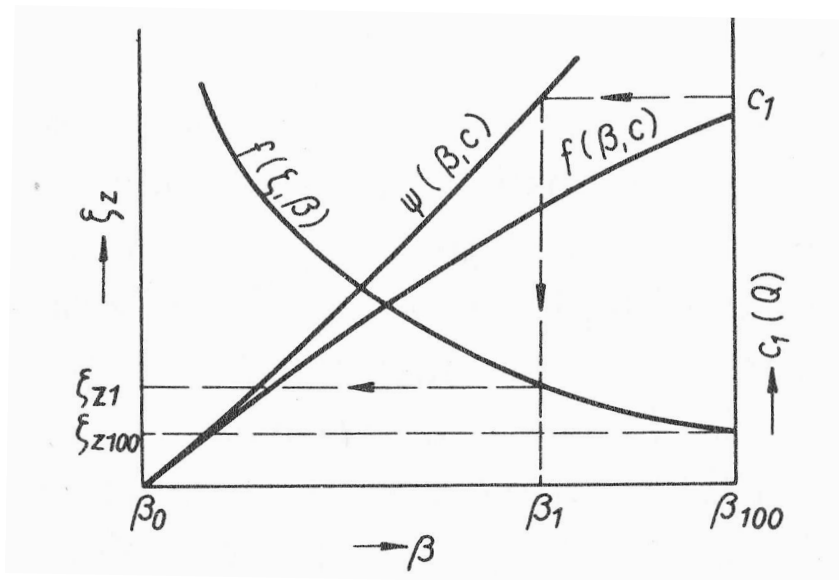
Obr. 1.1 Zpětná klapka [1]

## 1.1 Funkce a princip činnosti zpětných armatur

Hlavní funkcí u zpětných armatur je zejména funkce umožnění průtoku pracovní látky v požadovaném směru, ale zároveň zabránit průtoku látky ve směru opačném. Tato funkce musí být automatická a velmi spolehlivá za předpokladu značné jednoduchosti. Zpětné armatury nalézají použití v různých provozech pro různé pracovní podmínky a tekutiny. Jejich výskyt je v určitých oblastech velmi vysoký. Během normálního provozu mají být zpětné armatury zcela otevřené za předpokladu co nejmenšího průtokového odporu. [2], [3]

Pro řešení funkce zpětných armatur se používá několik funkčních principů: zpětné ventily, zpětné klapky, kulový ventil, motýlková klapka, deskový zpětný ventil nebo další. Každé toto provedení má své výhody a nevýhody. Zpětné ventily nezaručují těsnost proti uzavírané části potrubí nebo zařízení, protože těsnicí tlak může být v jednotlivých provozních případech malý. V případě nutnosti dobré těsnosti se doporučuje použití sériově řazené uzavírací armatury. Těsnost zpětné armatury můžeme vylepšit použitím měkkého těsnění. [2], [3]

Důležitá je i ztráta tlaku při normálním provozu u zpětných klapek. Ztrátový součinitel je velmi závislý na zdvihu kuželky nebo úhlu otevření talíře klapky viz obr. 1.2, kde  $\beta$  představuje úhel otevření v procentech a  $\xi_z$  ztrátový součinitel. Plné otevření, při němž je ztrátový součinitel nejmenší je dosaženo až při určité rychlosti pracovní látky. [2], [4]



Obr. 1.2 Pracovní charakteristiky zpětné klapky pro vodorovnou a pro svislou polohu a odporové charakteristiky [8]

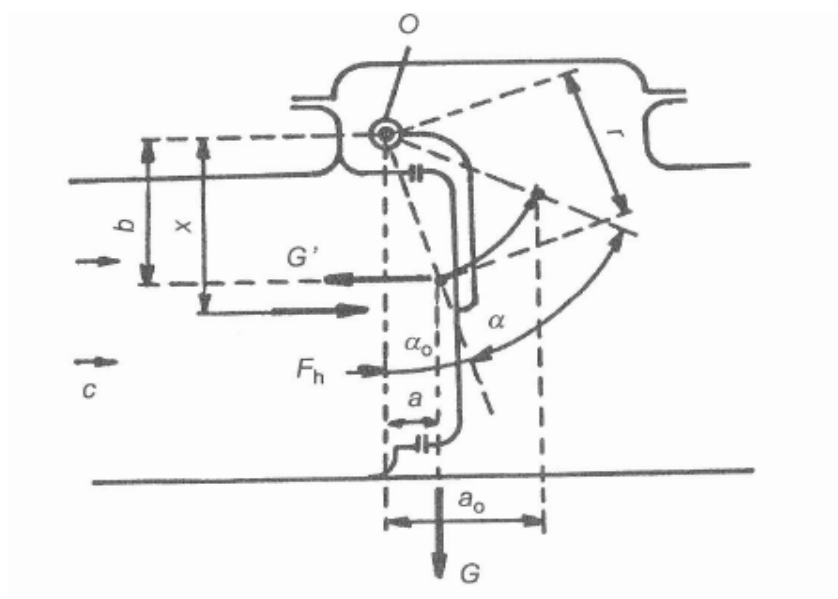
## 1.2 Průtok zpětnou klapkou a působení momentů sil

Schéma zpětné klapky je zobrazeno viz obr. 1.2. Princip je podobný jako princip zpětného ventilu, ovšem pro automatický funkční pohyb jsou důležité momenty sil působící na talíř zpětné klapky, který je otočně zavěšen s mírnou volností pohybu na páce, která je otočná kolem čepu  $O$ . Tento čep je umístěn nad sedly za jejich rovinou. Je-li rovina zpětné klapky vodorovná, Moment tíhy klapky  $M_V$  je dán její tíhou a vodorovnou vzdáleností  $a$  těžiště talíře a jeho páky od osy otáčení  $O$ . Tento mechanický moment se zvětšuje s úhlem otevření talíře klapky  $\alpha$  a je značen jako  $M_V$  (1.2.1). Opačný moment  $M_h$  vyvozuje na talíř klapky hydraulická síla proudící pracovní látky (1.2.2) a jeho bezrozměrný tvar je dán rovnicí. (1.2.3) [2]

$$M_V = G \cdot r \cdot \sin(\alpha + \alpha_0) \quad (1.2.1)$$

$$M_h = F_h \cdot x \quad (1.2.2)$$

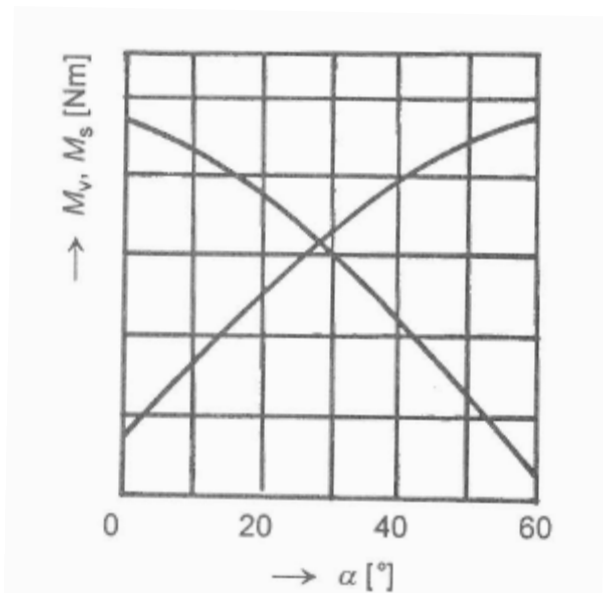
$$M_B = \frac{M_h}{D^3 \cdot c^2 \cdot \rho} \quad (1.2.3)$$



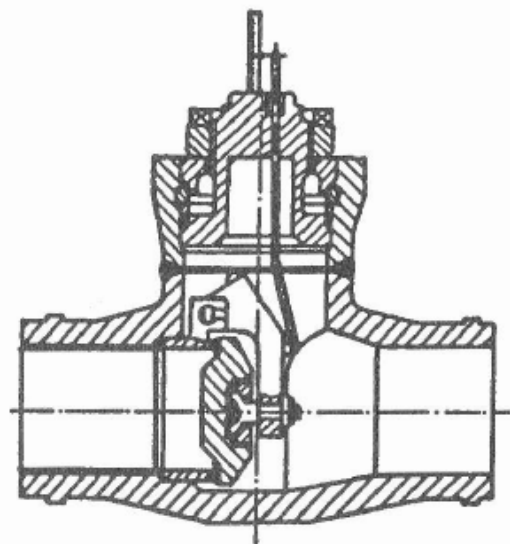
Obr. 1.3 Schéma zpětné klapky a příslušné momenty sil [8]

Použití zpětných klapek je umožněno ve vodorovné poloze, ale i v poloze svislé s vtokem ze spod. Je však třeba upozornit, že funkční charakteristiky jsou pro obě polohy zásadně jiné, protože mechanické momenty talíře klapky  $M_S$  (1.2.4) mají výrazně odchylný průběh. Příklad těchto momentů je zobrazen viz obr. 1.3, kde jsou zobrazeny momenty pro svislou polohu  $M_S$  a momenty pro vodorovnou polohu  $M_V$  pro vysokotlakou zpětnou klapku viz obr. 1.4. [3]

$$M_S = G \cdot r \cdot \cos(\alpha_0 + \alpha) \quad (1.2.4)$$



**Obr. 1.4 Mechanické momenty vysokotlaké zpětné klapky [8]**



**Obr. 1.5 Vysokotlaká zpětná klapka s úpravou pro měření úhlu otevření [8]**

Stejně jako u zpětných ventilů platí i pro zpětné klapky, že údaj ztrátového součinitele pro plné otevření talíře by měl být doplněn údajem o rychlosti pracovní látky, při níž je plné otevření dosaženo. Důležitý je také druh pracovní látky, pro které platí údaje.

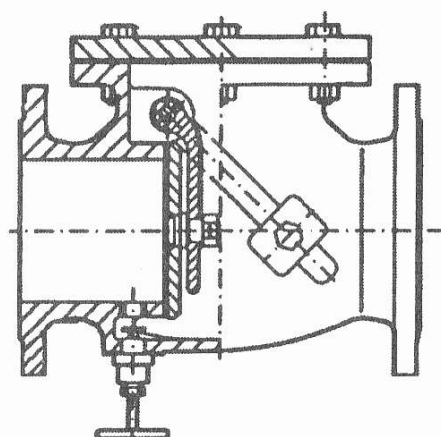
Pro zpětné armatury mohou být důležité i nestabilní funkční závislosti. Hlavním požadavkem je uzavření při zpětném průtoku, případně zabránění zpětnému toku. V řadě provozních případů je důležitý uzavírací čas. Takové funkční děje jsou závislé na rychlosti změny průtoku, při výpadku čerpadla nebo při roztržení potrubí, na setrvačnosti pohyblivých součástí zpětné armatury atd. Na celkový průběh uzavírání má také vliv uspořádání potrubí a jeho součástí. Příliš dlouhý čas uzavírání zpětné armatury by mohl umožnit zpětný průtok do potrubí, které musí být uzavřeno, nebo zpětný průtok čerpadlem. Příliš krátký čas může způsobit tlakový ráz. Toto je však velmi zjednodušeně řečeno, protože zpětná armatura má reagovat na provozní změny proudící pracovní látky pokud možno rychle. Vzhledem k setrvačnosti však reaguje s určitým zpožděním, takže např. při obrácení tlakového spádu a změně směru proudění není zpětná armatura ještě zcela zavřená a umožní jistý, zpětný průtok, který může způsobit prudké dovržení zpětné armatury a tlakový ráz. V takovém případě způsobí zpomalení dovírání zpětné armatury, např. kataraktem, sice zvětšení množství zpětně proniklé pracovní látky, ale zmenšení tlakového rázu. Naopak zrychlení zavírání, např. závažím může zajistit zrychlený pohyb uzavíracího orgánu a snížit množství zpětně proniklé pracovní látky, tj. značně omezit náhle zastavené průtočné množství, ale např. zvětšit tlakový ráz. [5]

Tyto děje jsou velmi komplikované, není pro ně k dispozici jednotný postup. Existují však výpočetní programy jednotlivých firem, které jednotlivé provozní případy řeší a doporučují vhodné provedení zpětné armatury pro daný průtok. [2], [4]

### 1.3 Hlavní konstrukční části zpětných klapek

Hlavní konstrukční části zpětné klapky je talíř, který je ve většině případů opatřený kovovým sedlem, ale pro některé pracovní podmínky i měkkým těsněním, které dosedá na sedlo tělesa buď kolmé, nebo šikmé vůči směru proudu. Talíř je pohyblivě uložený na páce s malým stupněm volnosti, z důvodu přizpůsobení roviny sedla v tělese. U klasické konstrukce je páka otočná v čepu mimo proud pracovní látky. Průběh uzavírání je u klapky méně příznivý, než u ventilových provedení, protože zpětný proud u ventilů se uplatňuje významnou silou při plném zdvihu kuželky současně také s tíhou kuželky, zatímco u klapky, jejíž talíř je v otevřené poloze položen téměř tečně k proudu pracovní látky, a proto se pro uzavření talíře klapky uplatňuje hlavně mechanický moment tíhy talíře a hydraulický uzavírací moment jen omezeně v první fázi. Z toho důvodu mají klapky větší tendenci způsobit tlakové rázy. Hydraulický vliv se u zpětných klapky při zpětném průtoku uplatňuje zejména v poslední fázi uzavírání a vede k prudkému uzavření klapky.

Opatření, která mohou zmírnit tlakové rázy, tak vedou k urychlení uzavírání talíře natolik, aby zpětný průtok vůbec nenastal. Toho se dosáhne buď zvýšením hmotnosti talíře klapky, nebo vnější pákou a závažím viz obr. 1.6. K tomu musí být z tělesa klapky vyveden otočný čep pomocí ucpávky. Závaží může být provedeno tak, že je na páce posuvné, proto uzavírací momenty a výslednou rychlost uzavírání lze přizpůsobit daným provozním podmínkám posunutím závaží na páce a změnou uzavíracího momentu. [3]



Obr. 1.6 Ocelová zpětná klapka se závažím a pákou a vnitřním obtokem [2]

## 1.4 Typy zpětných klapek

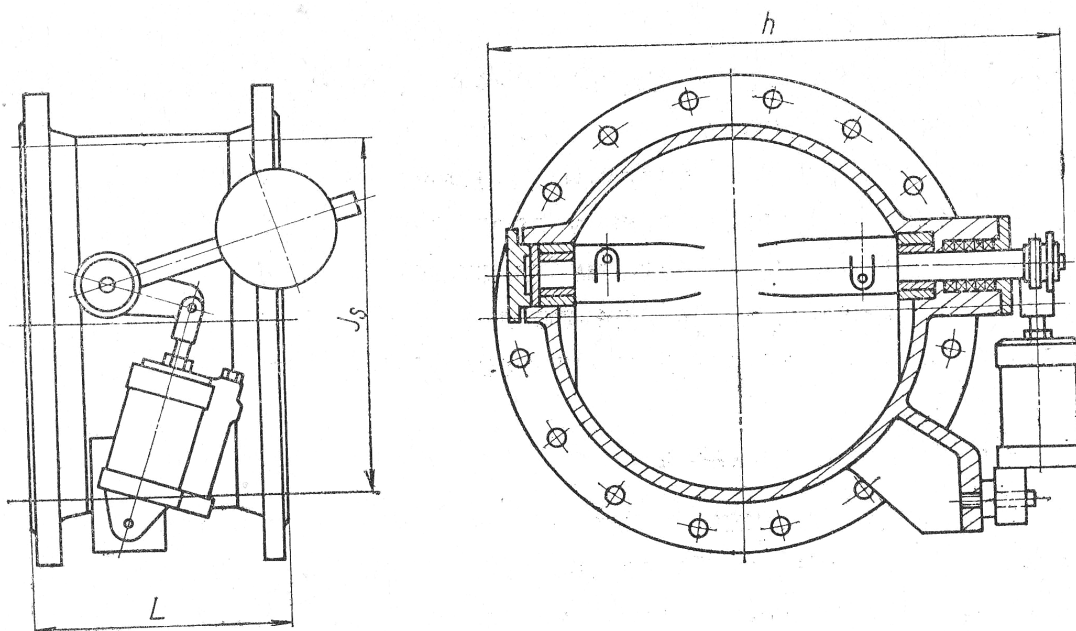
Vyrábějí se v různých druzích a v širokém rozsahu a to i o velkých jmenovitých světlostech. V některých případech nelze u těchto zpětných klapek počítat s úplnou těsností uzavěru a v uzavřeném stavu se dovoluje malá netěsnost. Průtočné odpory jsou menší, než u zpětných ventilů. Zpětné klapky lze používat i pro hustší tekutiny. Pro zvláštní případy se používají klapky speciální konstrukce. [2], [3]

### • ZPĚTNÁ KLAPKA S PÁKOU

Uzavírací ústrojí má spojeno s hřídelem, který je vyveden ucpávkou vně tělesa. Na konci hřídele je upevněna páka, na niž se nasazuje závaží nebo působí pružiny, které zajišťují uzavření při změně směru proudění. Na konce páky lze připojit též tlumič, který zpomaluje pohyb uzavíracího ústrojí a zabraňuje vzniku rázů při činnosti zpětné klapky. Provedení je obdobné jako u zpětné klapky motýlkové. [3]

### • ZPĚTNÁ KLAPKA MOTÝLKOVÁ

Ve válcovém tělese má desku otočnou kolem osy, mimoběžné k ose potrubí. V uzavřené poloze je deska skloněna o 15-20° od roviny kolmé k ose potrubí. Na vřeteno klapky, které je vyvedeno ucpávkou vně tělesa je nasazena páka se závažím, spojená s kataraktem. Těleso a deska klapky jsou ze šedé litiny nebo z oceli na odlitky, vřeteno je z uhlíkové oceli. Používají se pro vodorovná potrubí k dopravě čisté vody o teplotě 50 °C. [3], [10]



Obr. 1.7 Zpětná klapka motýlková [3]

- **ZPĚTNÁ KLAPKA VÍCENÁSOBNÁ**

Používá se pro potrubí o velkých průměrech. Těleso kulového tvaru je děleno šikmou rovinou a do přírubového spoje je vložena deska s několika zpětnými klapkami, které se otevírají a zavírají obvykle postupně podle velikosti průtoku. [3]

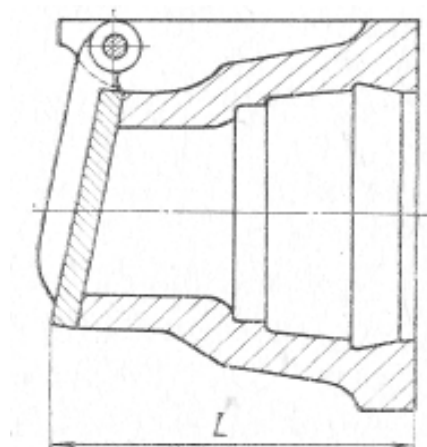
- **ZPĚTNÁ KLAPKA PRO ODSTRUSKOVACÍ POTRUBÍ A NAFTOVÉ PRODUKTY**

Zpětná klapka pro odstruskovací potrubí se používá u potrubí k hydraulické dopravě strusky z topenišť kotlů. Těleso je ze šedé litiny, těsnící plocha v tělese z neželezného kovu, na talíři klapky ze speciální pryže.

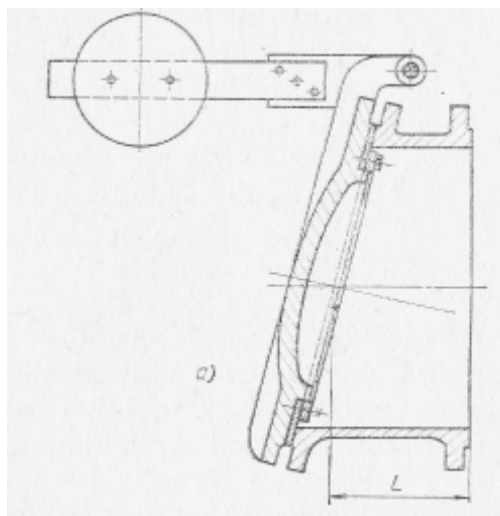
Zpětná klapka pro naftové produkty se vyrábí podle pracovní teploty z uhlíkových nebo slitinových ocelí. Používá se pro ropné produkty. [3]

- **KONCOVÁ KLAPKA**

Má šikmé sedlo skloněné od svislé roviny o  $15^\circ$ , na které dosedá talíř na závěsu s jedním čepem. Uzavření zajišťuje u některých konstrukcí závaží na páce. Těleso a talíř jsou ze šedé litiny, připojení k potrubí je přírubové nebo hrdlové. Těsnící plochy jsou buď z materiálu tělesa a talíře nebo na desce z kůže nebo pryže. Koncové klapky se používají k ukončení vypouštěcích potrubí jako ochrana před vniknutím kapaliny a nežádoucích předmětů a u potrubí ústících do vodních toků, ale také před vnikáním živočichů, není-li možné nebo účelné opatřit konec potrubí sítí. Koncové klapky se vyrábějí jako hrdlové viz obr. 1.8 nebo přírubové viz obr. 2.9. [3]



Obr. 1.8. Hrdlová koncová klapka [3]



Obr. 1.9 Přírubová koncová klapka [3]



- **PORUCHOVÉ KLAPKY**

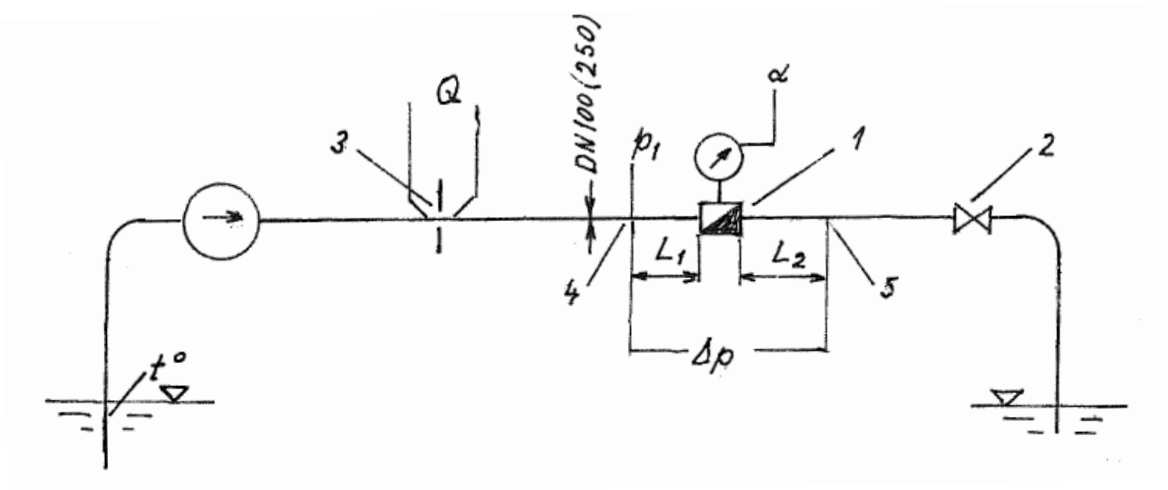
Používají se ve výjimečných případech jako ochranné zařízení k uzavírání potrubí při překročení nejvyššího dovoleného pracovního tlaku nebo předpokládaného největšího průtočného množství, respektive rychlosti proudění. Působí samočinně nebo se ovládají elektromagneticky. [3]

## 1.5 Současný přístup řešení zpětných klapek

V dnešní době, kdy jsou dobře dostupné vyspělé počítačové technologie a výpočetní software, můžeme říci, že jsou dva přístupy v řešení zpětných klapek. Jedná se o starší klasickou experimentální metodu a další metodou je metoda výpočetní (teoretická).

### 1.5.1 Experimentální metoda

Experimentální metoda je klasická, kde jsou zpětné klapky konstruovány a prakticky ověřeny na měřicích zařízeních a tratích, což se setkává s nevýhodou, že ne vždy máme k dispozici potřebné měřicí zařízení a tratě. Ovšem toto má i svou výhodu. Pokud máme k dispozici měřicí trať, můžeme klapku otestovat a naměřit prakticky za provozních podmínek. Při experimentální metodě máme většinou možnost měřit veličiny jako je tlak, respektive tlakový spád a objemový průtok. Měřicí trať, na které bylo provedeno měření, je zobrazena viz obr. 1.10.



Obr. 1.10 Schéma měřicí trati pro zpětnou klapkou  
(Součást zprávy o výsledcích měření od firmy Armatury Group) [12]

1. Měřená zpětná klapka
2. Regulační šoupátko
3. Clonka nebo dýza pro měření průtoku
4. Manometr před zpětnou klapkou
5. Manometr za zpětnou klapkou

Ovšem zde se nachází jedna velká nevýhoda, tento přístup neumožňuje vyšetřit podrobně proudění v potrubí a kolem klapky.

### **1.5.2 Numerická metoda**

Druhý přístup v řešení zpětných klapek je spíše teoretický. Jedná se o metodu, kdy je za pomoci počítačového softwaru vytvořen trojrozměrný model zpětné klapky a ten je následně otestován ve výpočetním softwaru jako je například program Ansys Fluent, kde se jedná o CFD modelování. Tento přístup má výhodu zejména v tom, že počítačové technologie jsou dnes již dostupné téměř všude a jsou mezi sebou kompatibilní. Zde odpadá i potřeba vlastnit měřící trať. Obrovskou výhodou však zde je to, že si můžeme kdykoliv zobrazit proudění uvnitř potrubí, armatur a dalších prvků. Avšak i zde nalezneme nevýhody. Je to zejména náročnost na výpočetní hardware a také složitost zadání vstupních veličin tak, aby simulovaly reálné podmínky.

### **1.5.3 Srovnání Experimentální a Numerické metody**

Obě tyto metody se setkávají s nepřesnostmi. V praktickém případě to mohou být zejména nepřesnosti měřících přístrojů. V teoretickém případě se nám ne vždy povede přesně nasimulovat reálné podmínky, které by byly právě na měřící trati, ale máme snazší možnosti verifikace modelu. Tato diplomová práce je věnována teoretickému řešení zpětných klapek, tedy numerickém CFD modelování v programu AnsysFluent a porovnání s naměřenými hodnotami z praktického měření.

## 2. DEFINICE MATEMATICKÉHO MODELU

Proudění je popisováno základními fyzikálními zákony, mezi které patří zákony zachování hmotnosti, hybnosti a tepla. Pro vyjádření těchto zákonů se používá Navier-Stokesovy rovnice (2.1) a rovnice kontinuity (2.2). Tyto rovnice popisují jak laminární, tak i turbulentní režim proudění. V případě nestacionárního nestlačitelného izotermního proudění mají následující tvar. [6], [7]

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z$$

- $u, v, w$  jsou složky rychlosti
- $p$  je tlak
- $\rho$  je hustota
- $\nu$  je kinematická viskozita
- $f_x, f_y, f_z$  jsou složky vnější objemové síly, tedy gravitační a odstředivé síly

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

- $u, v, w$  jsou složky rychlosti

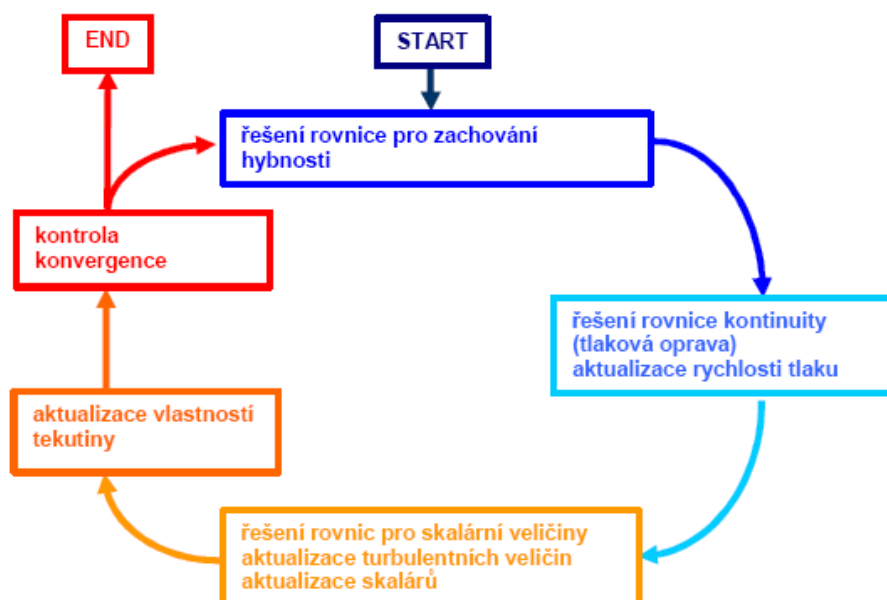
V případě modelování proudění s přestupem tepla je součástí matematického modelu také rovnice energie, která je uvedena v kapitole 5.5.

## 2.1 Ansys Fluent – Integrace pomocí metody konečných objemů

Velmi zjednodušeně můžeme říci, že integrací diferenciálních rovnic dosáhneme objemového integrálu, který následně lze pomocí divergenčního teorému převést na plošný integrál. Následná diskretizace udává algebraický tvar těchto rovnic.

Rovnice, které jsou řešené ve Fluentu jsou rozšířením předchozích rovnic na třídimenzionální křivočarý souřadný systém. Každá iterace sestává z kroků, které jsou zobrazeny diagramem viz obr. 2.1 a můžeme je popsat následovně: [6]

- pohybové rovnice pro neznámé složky rychlosti jsou řešeny s užitím hodnot tlaků tak, aby se aktualizovalo rychlostní pole
- rychlosti určené v předchozím bodě nemohou splňovat rovnici kontinuity, proto se určují tzv. tlakové korekce a následně korekce i rychlostního pole
- pomocí nových hodnot rychlostí se řeší rovnice pro turbulentní energii  $k$  a disipaci  $\varepsilon$
- řeší se další rovnice pro určení teploty a dalších skalárních veličin
- aktualizují se fyzikální vlastnosti kapalin (např. viskozita)
- kontrola konvergence



Obr. 2.1 Diagram algoritmu řešení Fluentem včetně integrace [6]

## 2.2 Matematické modelování turbulentního proudění - metody

Matematické modelování turbulentního proudění je neustále ve stádiu výzkumu a vývoje, který se neustále mění. To závisí zejména na pokroku v matematickém, technickém a fyzikálním odvětví. Numerická simulace turbulentního proudění obsahuje tři teoretické a odlišné přístupy řešení, které vyplývají ze zjednodušujících modifikací výchozích rovnic popisujících proudění. [13]

- Metoda přímé simulace (DNS-Direct Numerical Simulation)
- Metoda velkých vírů (LES-Large Eddy Simulation)
- Metoda časového středování (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)

Nejpoužívanějším nástrojem pro většinu úloh turbulentního proudění zůstávají statistické modely turbulence, které jsou založeny na metodě časového středování veličin turbulentního proudění (RANS) a na následující proceduře časového středování bilančních rovnic. Okamžitou hodnotu turbulence lze rozdělit na dvě hodnoty. Jedná se o hodnotu časově středovanou a hodnotu flukтуаční. Zavedením tohoto předpokladu do soustavy rovnic a užití Reynoldsových pravidel vzniká v Navier-Stokesově rovnici nový člen, který nazýváme Reynoldsovo turbulentní napětí. Toto napětí je příčinou vzniku tenzoru napětí o devíti členech. Zde vzniká velký počet diferenciálních rovnic s velkým počtem neznámých. Z tohoto důvodu je tento systém velkého počtu diferenciálních rovnic řešitelný jen velmi obtížně.

Podle modelování turbulentní viskozity je možné modely turbulence rozdělit do tří skupin. Pro rozdělení do skupin je rozhodující počet doplňujících diferenciálních rovnic. Jedná se o tyto skupiny: [6], [8]

- Algebraický model
- Jednorovnicový model
- Dvourovnicový model

Při výpočtech diplomové práce v prostředí programu Ansys Fluent, který pracuje s metodou časového středování (RANS) jsem použil pro výpočet dvourovnicové modely pro nestlačitelné proudění vody. Jednalo se o první model k- $\epsilon$  standard a druhý model k- $\omega$  standard.

### 2.2.1 Dvourovnicový k-ε model

Tento dvourovnicový model určuje turbulentní viskozitu pomocí dvou transportních rovnic pro  $k$  a  $\varepsilon$ . Model je založen na Boussinesqově hypotéze o vírové viskozitě a vztahuje  $\mu_t$  ke  $k$ ,  $\varepsilon$  a  $c_\mu$ . [6]

$$\mu_t = c_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.2.1)$$

Rozložení  $k$  je dáno transportní rovnicí. Exaktní tvar transportní rovnice pro  $\varepsilon$  je možné odvodit z Navier-Stokesových rovnic. Tato rovnice obsahuje komplexní korelace, které je nutné znovu aproximovat. Výsledný tvar rovnice pro rychlost disipace používaný v k-ε modelu je uveden v rovnici (2.2.2) a (2.2.3). [6], [7]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_t \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \cdot \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - c_D \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (2.2.2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \cdot v_t \cdot \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \cdot \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - c_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.2.3)$$

Pro stlačitelné proudění lze definovat matematický model pomocí rovnic 2.2.4 až 2.2.7. [6], [9]

- Rovnice kontinuity, která je platná i pro středované veličiny.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2.2.4)$$

- Rovnice pro přenos hybnosti.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[ (\mu + \mu_t) \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] + \rho \delta_{i3} g + \rho \cdot f_c \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j + \rho f_i \quad (2.2.5)$$

Jedná-li se o dvourovnicový k-ε model, jsou tyto rovnice doplněny dále o rovnice pro přenos kinetické turbulentní energie  $k$  a rychlosti disipace  $\varepsilon$ .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - g_j \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (2.2.6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \cdot c_{1\varepsilon} \cdot (P + c_{3\varepsilon} \cdot G) - \rho \cdot c_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.2.7)$$

V těchto rovnicích jsou konstanty, které jsou určeny empiricky, dále pak turbulentní produkce kinetické energie v důsledku napětí a vztahových sil, které jsou popsány písmeny  $P$  a  $G$  a Prandtlůvo turbulentní číslo (2.2.8).

$$\sigma_h = \frac{\mu_t}{\lambda_t} \cdot c_p \quad (2.2.8)$$

- Konstanty, které jsou určeny empiricky a jejich hodnoty
  - $C_{1\varepsilon} = 1,44$  [-]
  - $C_{2\varepsilon} = 1,92$  [-]
  - $C_{3\varepsilon} = 1$  [-]
  - $\sigma_k = 1$  [-]
  - $\sigma_\varepsilon = 1,3$  [-]

- Produkce turbulentní kinetické energie v důsledku napětí a vztahových sil

$$P = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.2.9)$$

$$G = -g_j \frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2.2.10)$$

### 2.2.2 Dvourovnicový k- $\omega$ model

K- $\omega$  model standard je v programu Ansys Fluent vytvořen na základě Wilcoxova k- $\omega$  modelu, který přidává pro nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost a rozložení smykového napětí. Tento model je založen na bázi transportních rovnic pro turbulentní kinetickou energii  $k$  a specifický poměr disipace  $\omega$ . Jedná se tedy o empirický model, který může být pojat jako poměr  $\varepsilon$  ku  $k$ . V průběhu let došlo k inovaci k- $\omega$  modelu a přidání dalších podmínek do rovnic pro  $k$  a  $\omega$ . Tímto přidáním se poměrně zlepšila přesnost modelu v oblasti predikce smykového napětí. Turbulentní kinetická energie  $k$  a specifický poměr disipace  $\omega$  jsou získány z následujících rovnic [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.2.12)$$

$G_k$  – produkce kinetické turbulentní energie v důsledku gradientu střední rychlosti

$G_\omega$  – produkce disipace  $\omega$

$S_k, S_\omega$  – Zdrojové členy, které jsou definovány uživatelem

$Y_k, Y_\omega$  – Disipace  $k$  a  $\omega$  v důsledku turbulence

$\Gamma_k, \Gamma_\omega$  – Efektivní difuzivita  $k$  a  $\omega$



## 2.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Program FLUENT umožňuje zadávat pro výpočet proudění nebo přenosu tepla různé varianty okrajových podmínek. Tyto podmínky nejsou přímo součástí matematického modelu, ale protože v další kapitole bych se rád věnoval už samostatnému numerickému výpočtu v programu Ansys Fluent, jsou zde uvedeny okrajové podmínky, které byly použity.

- **TLAK NA VSTUPU (PRESSURE INLET)**

Tlaková podmínka na vstupu se používá, pokud je znám celkový (totální) tlak nebo statický tlak a průtok nebo rychlost. Tato podmínka je vhodná i pro proudění s uvažováním vztakových sil. Na vstupu se definuje celkový (totální) relativní tlak, který je vztažen k operačnímu tlaku vztahem odvozeným z Bernoulliho rovnice, přitom hustota je konstantní nebo je funkcí teploty. Při zadání tlakové podmínky je nutné určit směr proudění pomocí složek rychlosti případně pomocí proudění v normálovém směru k hranici. Statický tlak na vstupu musí být specifikován v případě supersonického proudění. Turbulentní veličiny jsou určovány shodně jako v případě okrajové podmínky hmotnostního průtoku. [6], [9]

- **HMOTNOSTNÍ PRŮTOK (MASS-FLOW)**

Tato podmínka se používá k definování okrajové podmínky na průtočné hranici do oblasti. U stlačitelného proudění se předpokládá nekonstantní hustota, která je závislá na stavových veličinách tlaku a teploty a ovlivňuje objemový průtok a tím rychlost, což může vést k nereálným výsledkům. Tuto podmínku a její závislost můžeme definovat rovnicí hmotnostního průtoku. Kde  $\rho$  představuje hustotu proudící kapaliny,  $S$  plochu průřezu a  $v$  rychlost proudění kapaliny. Tato podmínka se může zadávat na vstupu, tedy jako „INLET“ nebo výstupu „OUTLET“. [6], [9]

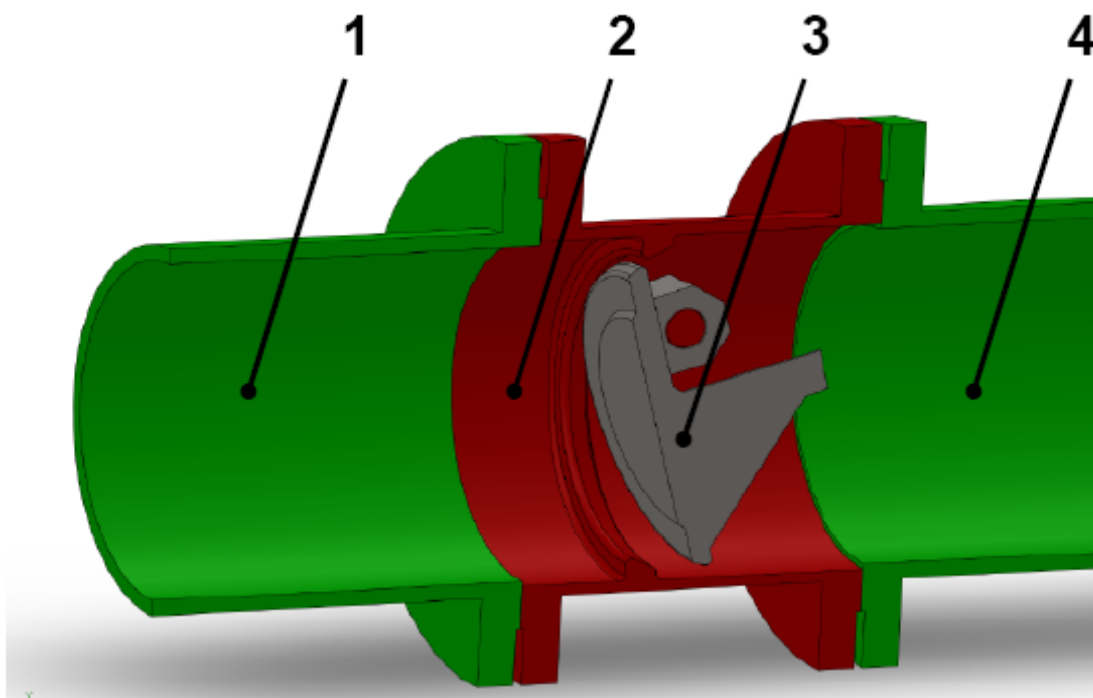
$$Q_m = \rho \cdot Q = \rho \cdot S \cdot v \quad (2.2.13)$$

- **OUTFLOW**

Podmínka Outflow je nevhodná pro stlačitelné proudění. Není rovněž vhodná pro nestacionární proudění s měnící se hustotou a v případě zadaného tlaku na vstupu. [6], [9]

### 3. TVORBA 3D GEOMETRIE A VÝPOČETNÍ SÍŤ

Při zadání diplomové práce jsem obdržel soubor ve formátu STEP od firmy Armatury Group, který obsahoval kompletní geometrii škrticí klapky, talíře a vstupního a výstupního potrubí. Protože soubor byl typu STEP, nepodařilo se mi jej rozložit na jednotlivé díly a musel jsem proto vytvořit kompletně novou geometrii. V programu Solidworks jsem načel soubor typu STEP a postupně odměřil všechny potřebné rozměry a poté vytvořil jednotlivé prvky, z nichž jsem sestavil výslednou sestavu viz obr. 3.1. Sestava byla fixována mezi sebou pomocí pevných vazeb s výjimkou úhlové vazby talíře klapky a tělesa klapky. Tato vazba mi umožnila nastavení libovolného úhlu otevření klapky v rozmezí minima 0° až maxima 90° v libovolné poloze. Pro potřeby diplomové práce byly nastaveny úhly otevření talíře klapky ve stupních následovně: 8, 16, 25, 35, 45, 55, 63 a 75 stupňů.

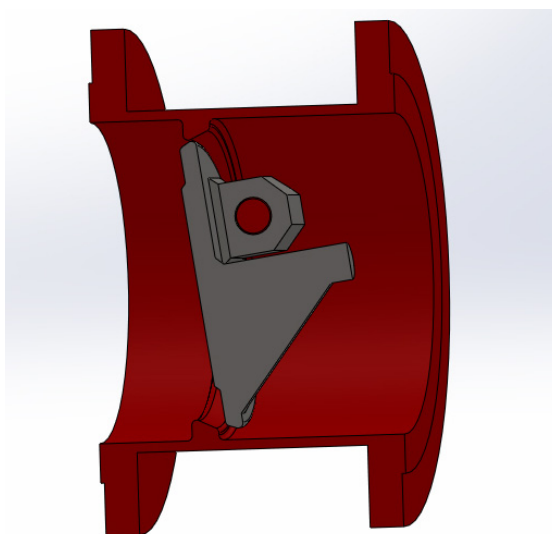


**Obr. 3.1 Výsledný 3D model sestavy zobrazený v řezu s úhlem otevření talíře 16°  
(výstupní potrubí je z důvodu značné délky na obrázku zkráceno)**

- 1 – Vstupní potrubí o délce 0,27 m a vnitřním průměru 0,25 m
- 2 – Těleso zpětné klapky o vnitřním průměru 0,257 m
- 3 – Talíř zpětné klapky
- 4 – Výstupní potrubí o délce 2,7 m a vnitřním průměru 0,25 m

### 3.1 Tvorba geometrie v programu Design Modeler

Po vytvoření této sestavy jsem přešel do programu Ansys Fluent, konkrétně programu Workbench a jeho podprogramu Design Modeler. Tento program slouží k tvorbě trojrozměrné sítě. Jelikož už jsem měl ale geometrii předem hotovou, tak jsem ji zde pouze importoval pomocí příkazu „Import External Geometry File“ jako soubor typu STEP. Protože se ale v průběhu tvorby výpočetní sítě vyskytly velké problémy, rozhodl jsem se za účelem zjednodušení výpočetní sítě, že importuji pouze soubor typu STEP, který obsahoval pouze těleso klapky a talíř klapky viz obr. 3.2. a upravil jsem ho v Design Modeleru.



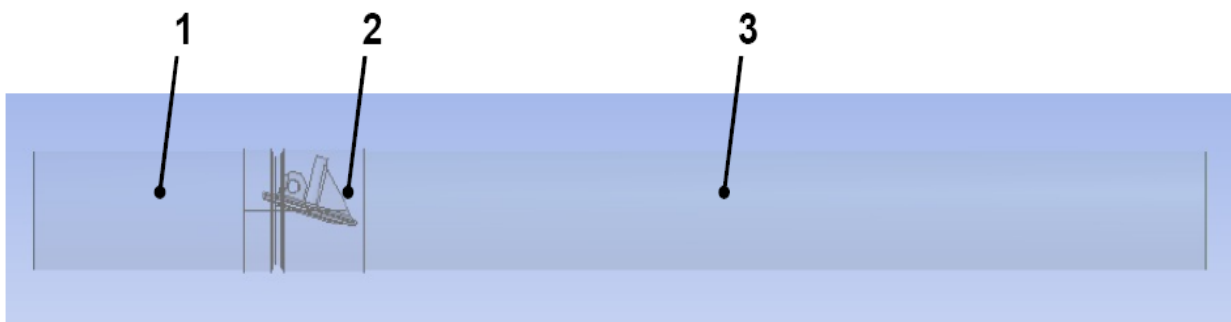
Obr. 3.2 Importované těleso klapky s talířem klapky

Další úpravy pokračovaly následovně. Vytvořil jsem na jednu ze základních rovin kolem tělesa klapky čtverec, který jsem vytáhnul pomocí příkazu „Extrude“. Po vytažení jsem použil příkaz „Boolean - Subtract“, který mi těleso rozdělil na dvě části. Jednalo se o část vnitřního objemu tělesa klapky a vnějšího objemu kolem tělesa klapky. Protože pro další postup jsem potřeboval pouze vnitřní objem tělesa klapky, použil jsem příkaz „Body Operation – Delete“ a odstranil vnější objem, tak aby zbyl pouze objem vnitřní. Tímto byla prostřední část hotova a následovalo vytvoření vstupního potrubí a výstupního potrubí.

Objem vstupního potrubí jsem vytvořil pomocí příkazu „Extrude“. Označil jsem přední rovinu vnitřního objemu, na kterou jsem nakreslil kružnici o průměru 0,25 m a vytáhnul ji do vzdálenosti 0,5 m.

Tvorba objemu výstupního potrubí byla totožná s tím rozdílem, že jsem označil zadní rovinu vnitřního objemu, a protože se budeme zabývat prouděním za talířem klapky, délka

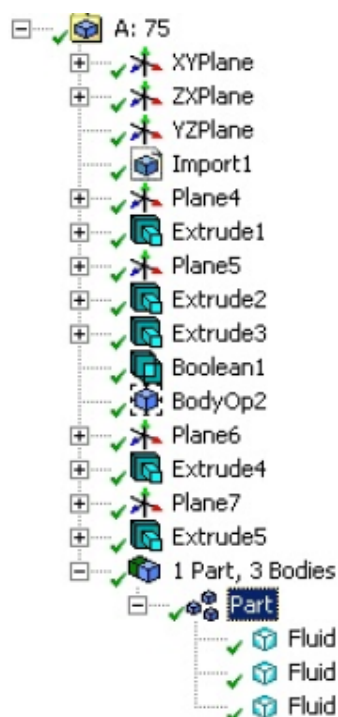
výstupního potrubí byla vysunuta do vzdálenosti 2 m. Tímto jsem vytvořil výslednou geometrii, viz obr. 3.3.



**Obr. 3.3 Výsledné tři objemy geometrie**

- 1 – Objem vstupního potrubí
- 2 – Objem tělesa klapky (zde je úhel otevření talíře klapky pro názornost 75°)
- 3 – Objem výstupního potrubí

Všechny tyto operace, ať už importace nebo vysunutí byly prováděny jako „Add Frozen“ a výsledné tři objemy byly označeny jako „Fluid“ a sloučeny do jednoho „Partu“ (prvku) viz obr. 3.4. Na tomto obrázku je zobrazen i tzv. „strom“ postupu tvorby objemů geometrie pro úhel otevření talíře klapky 75°.



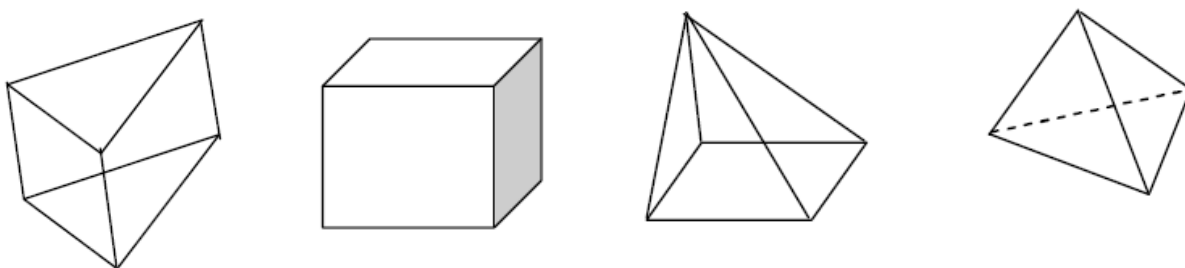
**Obr. 3.4 „Strom“ postupu tvorby výsledných tří objemů a jejich sloučení do jednoho „Partu“ (prvku)**

### 3.2 Vytvoření výpočetní sítě

Po dokončení výsledných tří objemů jsem stále zůstal v programu Workbench ale přepnul jsem se do druhého jeho podprogramu, který má název „Meshing“. Tento podprogram slouží převážně k tvorbě výpočetní sítě, ale můžeme zde najít i další funkce.

Při tvorbě výpočetní sítě jsem se setkal s řadou problémů, které se nakonec ukázaly jako zásadní problémy při neúspěšných výpočtech ve Fluentu. Proto jsem provedl několik metod tvorby výpočetní sítě, z nichž nakonec tato metoda se ukázala jako úspěšná a bez problému na ni fungovaly i výpočty ve Fluentu. Výsledná metoda síťování spočívala v tom, že jsem síťoval každý ze tří objemů zvlášť.

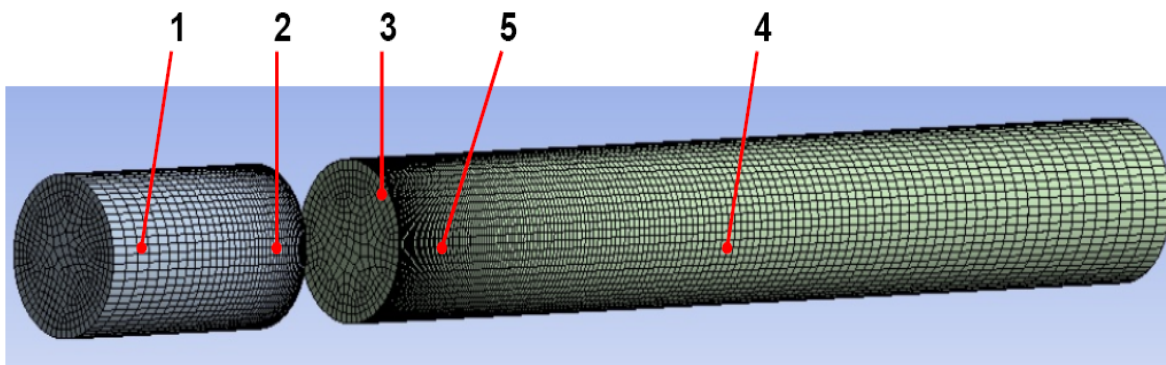
Jelikož se jedná o objemové síťování, tak pro vytvoření výpočetní sítě máme k dispozici 3D elementy. Jedná se o čtyřstěnné a šestistěnné prvky, dále pak o klínovité a pyramidové prvky viz obr. 3.5. [15]



Obr. 3.5 Základní trojrozměrné elementy [11]

#### 3.2.1 Vytvoření výpočetní sítě vstupního a výstupního objemu potrubí

Pro objem vstupního a výstupního potrubí viz obr. 3.6 jsem určil metodu „SWEEP“, která je založena na vysunutí průřezu po dané délce. V nastavení této metody jsem ponechal téměř vše automatické. Mnou nastavené hodnoty byly pouze počty buněk po obvodu a zhuštění výpočetní sítě. Nastavení počtu buněk po obvodu bylo velmi jednoduché, neboť stačilo pouze označit vstupní kruhovou hranu a zadat počet potřebných buněk po obvodu, kterých jsem zadal rovných šedesát buněk. Nastavení zhuštění výpočetní sítě nebylo také nijak složité. Protože jsem potřeboval zhuštění výpočetní sítě u talíře klapky, tak u objemu vstupního potrubí jsem zhuštění zadal až na konci objemu (vztaženo ke směru proudění). Naopak u objemu vstupního potrubí hned na začátku.

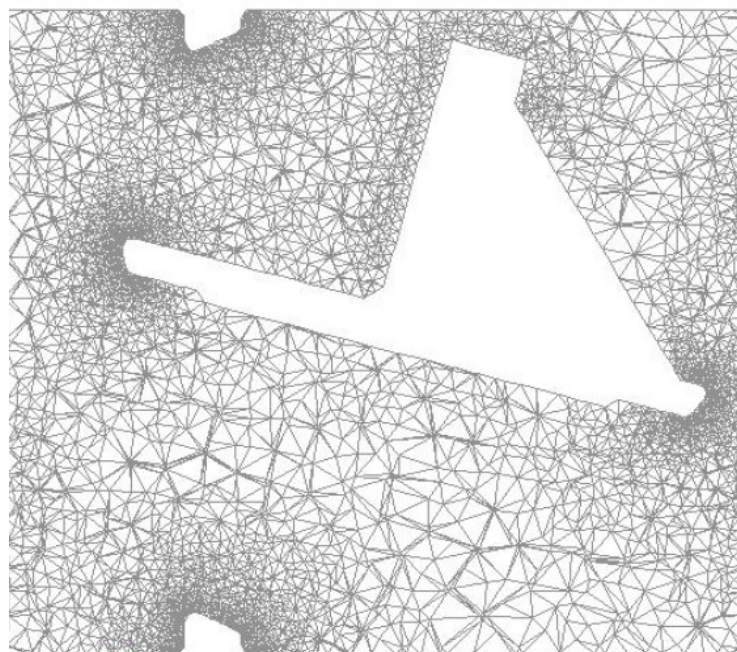


**Obr. 3.6 Výpočetní síť vstupního a výstupního objemu potrubí  
vytvořená pomocí metody SWEEP**

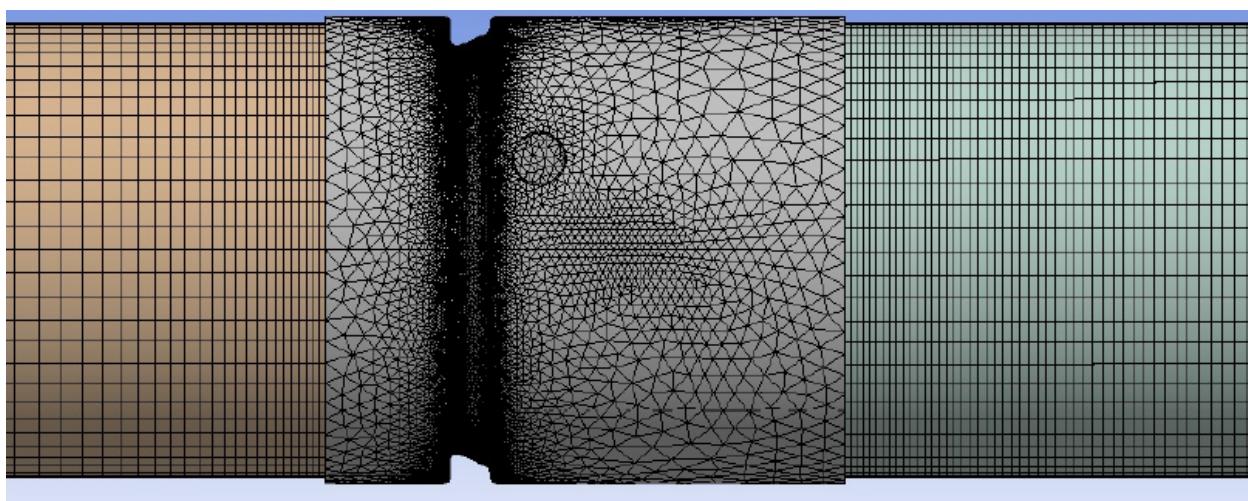
- 1 – Objem vstupního potrubí
- 2 – Zhuštění sítě objemu vstupního potrubí
- 3 – Nastavení 60-ti buněk po obvodu
- 4 – Objem výstupního potrubí
- 5 – Zhuštění sítě objemu výstupního potrubí

### **3.2.2 Vytvoření výpočetní sítě objemu tělesa klapky a kolem talíře klapky**

Po dokončení výpočetní sítě vstupního a výstupního objemu potrubí následovalo vytvoření sítě prostřední části, teda objemu tělesa klapky a kolem talíře klapky. Tento objem byl velmi složitý na vytvoření sítě, neboť talíř klapky, který se nachází uvnitř objemu tělesa klapky má velký počet hran a zaoblení. Pro tuto část tedy nepřicházela v úvahu metoda SWEEP. Protože jsem jen velmi těžko dokázal odhadnout, která metoda bude zde nejvhodnější, nechal jsem tuto část vysítovat automatickou metodou viz obr. 3.7. Na obrázku 3.7 můžeme vidět, že kolem hran a zaoblení vzniká velký počet malých buněk. Po dokončení byla výpočetní síť kompletně hotová viz obr. 3.8 a celkem obsahovala  $1,1 \cdot 10^6$  až  $1,3 \cdot 10^6$  buněk v závislosti na úhlu otevření talíře klapky. Na obrázku 3.8 můžeme rovněž vidět, jak kolem zaoblení a hran vznikají miniaturní buňky, vzhledem k ostatním buňkám.



**Obr. 3.7 Výpočetní síť prostřední části – objemu tělesa klapky a kolem talíře klapky zobrazená v řezu**

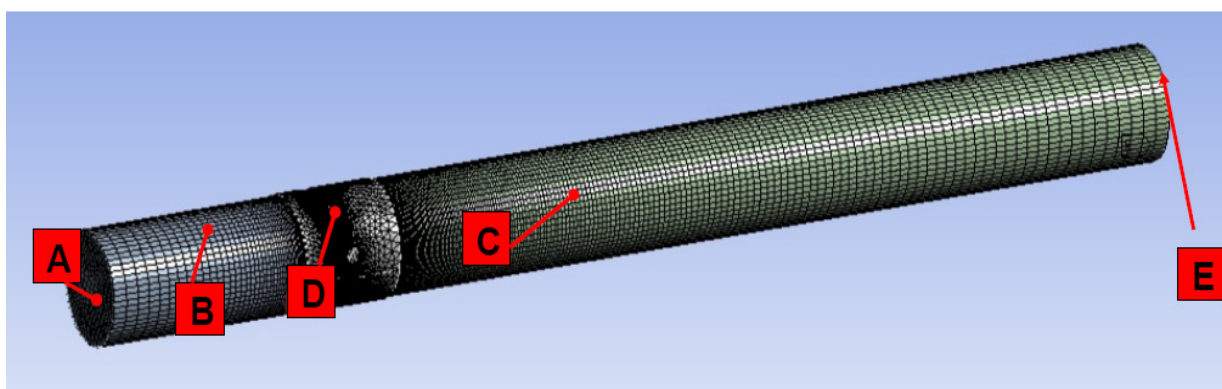


**Obr. 3.8 Kompletní výpočetní síť (vstupní a výstupní část je z důvodu značné délky zkrácena)**



### 3.3 Pojmenování ploch objemů

Jak už bylo řečeno, podprogram „Meshing“ má také další funkce. Jednou z nich je například vytvoření názvu plochy (originální příkaz „Create Named Selections“). Tento příkaz nám slouží k pojmenování jednotlivých libovolných ploch, které si předem označíme a nazveme libovolně viz obr. 3.9. Tato funkce je užitečná zejména pro pozdější výpočty ve Fluentu, kde se plochy definují jako vstupní nebo výstupní podmínka, či stěnové funkce. Poslední potřebné plochy, které bylo třeba označit a pojmenovat, byly plochy talíře klapky. Tyto plochy ale z důvodu umístění talíře klapky uvnitř objemu tělesa klapky bylo nemožné označit a pojmenovat. Toto vyřešil program Fluent, který si později sám plochy označil a pojmenoval.



Obr. 3.9 Označení jednotlivých ploch objemů („Create Named Selections“)

❖ Názvy ploch objemů:

- A – INLET (Pro vstupní okrajovou podmínku)
- B – WALL1 (Pro stěnovou podmínku)
- C – WALL3 (Pro stěnovou podmínku)
- D – WALL2 (Pro stěnovou podmínku)
- E – OUTLET (Pro výstupní okrajovou podmínku)



## 4. NUMERICKÝ VÝPOČET V PROGRAMU ANSYS FLUENT

Po dokončení výpočetní sítě jsem přešel k samotnému numerickému výpočtu proudění v programu Ansys Fluent. Zde bylo nejprve nutné zjistit, která výpočetní metoda bude nejvhodnější. Na začátku jsem vzal v úvahu tři dvourovnicové modely. Jednalo se o modely  $k-\epsilon$  standard,  $k-\epsilon$  RNG a  $k-\omega$  standard. Všechny tyto dvourovnicové modely měly nastaveny standardní stěnové funkce.

Po zvolení tří základních modelů bylo také nutné určit okrajové podmínky. Zde jsem vycházel z dodané zprávy firmou Armatury Group o výsledcích měření firmou a určil jsem dvě základní „sady“ okrajových podmínek, kde jsem poté každému úhlu otevření talíře klapky nastavil jednu z nich a provedl numerický výpočet s předem vybraným modelem turbulence. Jednalo se o následující okrajové podmínky:

### 1. Průtoková podmínka

- Vstup (Inlet) byl nastaven jako okrajová podmínka Mass-Flow-Inlet
- Výstup (Outlet) byl nastaven jako okrajová podmínka Outflow

### 2. Tlaková podmínka

- Vstup byl nastaven jako okrajová podmínka Pressure-Inlet
- Výstup byl nastaven jako okrajová podmínka Mass-Flow-Inlet

### 4.1 Nastavení výpočetních parametrů

Po nastavení daného výpočetního modelu bylo nutné nastavit proudící médium, protože program Ansys Fluent má automaticky předdefinované proudící médium jako vzduch (Air). Proto jsem v záložce Cell Zone Conditions načel z databáze Fluentu proudící médium vodu v kapalném stavu (Water-Liquid).

V záložce s názvem Boundary Conditions se zobrazily předem pojmenované plochy objemů, viz kapitola 3.3. Jednalo se tedy o položky Inlet, Outlet, Wall1, Wall2, Wall3. Program Fluent zde navíc detekoval další dvě plochy jako Wall-Part-Fluid a Interior-Part-Fluid. Pod názvem Wall-Part fluid si program Fluent automaticky označil plochy talíře klapky, a proto jsem pak mohl vyhodnotit síly působící na talíř klapky. Co se týče názvu Interior-Part-Fluid, tak zde můžeme zjednodušeně říci, že se jedná o zbylé útvary a ve výsledku nepotřebné pro vyhodnocení.

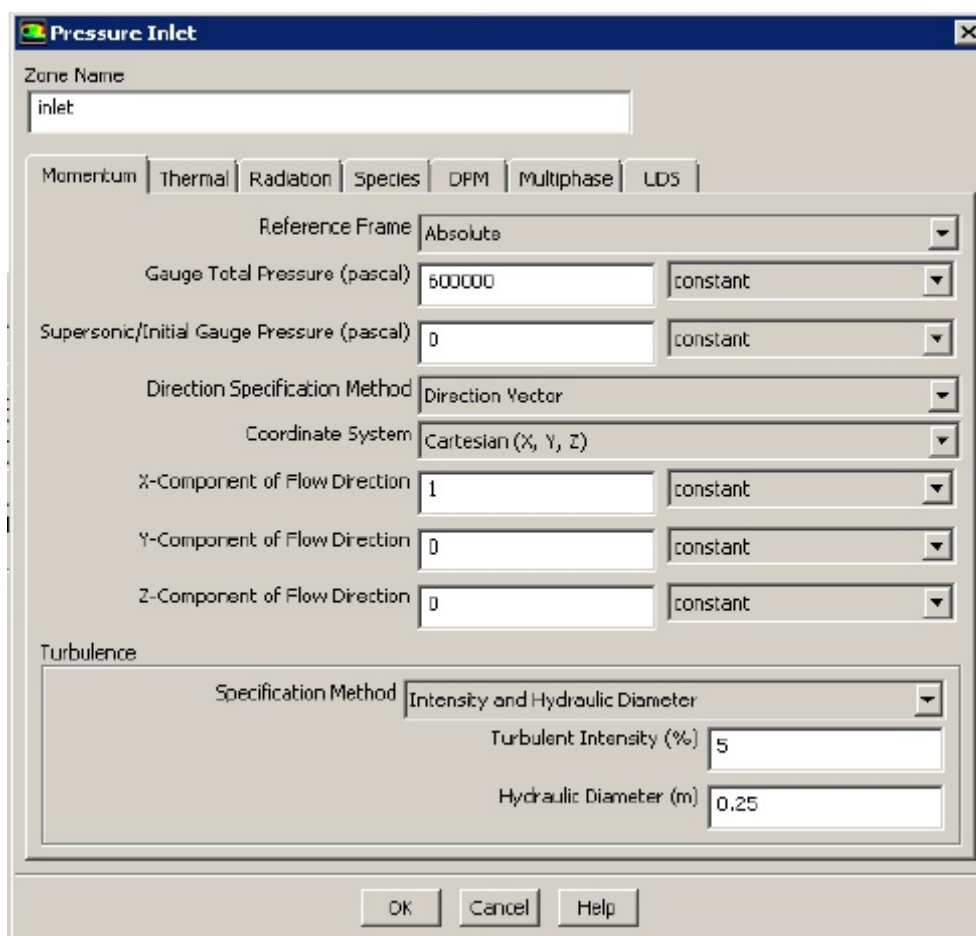
Zde jsem definoval tedy okrajové podmínky pro následující názvy:

- Wall1, Wall2, Wall3 a Wall-Part-Fluid jako okrajová podmínka Wall (Stěna)
- Interior-Part-Fluid jako okrajová podmínka Interior (Interiér)
- Inlet jako vstupní okrajová podmínka Mass-Flow-Inlet nebo Pressure-Inlet
- Outlet jako výstupní okrajová podmínka Outflow nebo Mass-Flow-Inlet

Okrajové podmínky Wall a Interior nebylo nutné nijak dále nastavovat.

#### 4.1.1 Nastavení okrajové podmínky Pressure-Inlet

V nastavení této okrajové podmínky jsem vycházel z dodané zprávy o měření od firmy Armatury Group, kde se v této zprávě uvádělo, že tlak před škrticí klapkou byl v rozmezí  $5,5 \cdot 10^5$  Pa až  $6 \cdot 10^5$  Pa. Proto jsem jako vstupní tlak nastavil hodnotu  $6 \cdot 10^5$  Pa. Dále v tomto nastavení jsem zadal intenzitu turbulentního proudění a hydraulický průměr. Intenzitu turbulentního proudění jsem nastavil na hodnotu 5% a hydraulický průměr na hodnotu 0,25 m, viz obr. 4.1.



Obr. 4.1 Nastavení vstupní okrajové podmínky Pressure-Inlet

#### 4.1.2 Nastavení okrajové podmínky Mass-Flow-Inlet

Tuto podmínku jsem nastavil v jednom případě jako vstupní a v druhém jako výstupní. Nastavení se ovšem nijak neodlišovalo, jen v tom, že bylo definováno buď na plochu Inlet nebo Outlet. Stejně jako u okrajové podmínky Pressure-Inlet jsem i zde vycházel z dodané zprávy o měření od firmy Armatury Group, jejíž součástí byla také tabulka, kde pro každý úhel otevření byla definována rychlost proudění. Z této rychlosti jsem poté vypočetl hmotnostní průtok (2.2.12) a vytvořil tabulku hmotnostních průtoků viz obr. 4.2. Hmotnostní průtok jsem pak definoval do nastavení pro každý úhel otevření talíře klapky. Pro specifikaci turbulentních veličin jsem rovněž zvolil intenzitu turbulentního proudění a hydraulický průměr se stejným nastavením jako u okrajové podmínky Pressure-Inlet.

$\alpha [^\circ]$	$v [m.s^{-1}]$	$Q_m [kg.s^{-1}]$
8	0,34	16,65
16	0,47	23,02
25	0,61	29,87
35	0,68	33,30
45	1,05	51,42
55	1,42	69,54
63	1,83	89,62
75	3,42	167,49

Obr. 4.2 Tabulka hmotnostních průtoků pro každý úhel otevření talíře klapky  
zadávána do okrajové podmínky Mass-Flow-Inlet

#### 4.1.3 Nastavení okrajové podmínky Outflow

Tuto podmínku nebylo třeba nijak nastavovat. Proto jsem zde jen potvrdil všechny možnosti kliknutím na tlačítko OK.

#### 4.1.4 Nastavení ostatních parametrů

Nastavení ostatních parametrů spočívalo pouze v tom, že v záložce Monitors jsem zvětšil přesnost reziduálů s předem nastavených  $10^{-3}$  na  $10^{-4}$ . Poté jsem v záložce Solution Initialization provedl inicializaci a přešel ke spuštění výpočtu.

## 4.2 Vyhodnocení výpočtů

Tímto nastavením jsem propočítal všech osm úhlů otevření talíře klapky třemi dvourovnicovými modely a každý úhel a model s jinou sadou okrajových podmínek. Po dokončení výpočtu jsem vždy všechny vyhodnocované hodnoty zapsal do tabulky, viz obr. 4.3. Pro získání hodnoty výsledné síly působící na klapku jsem použil funkci „Forces“ a pro určení hodnoty tlakových spádů funkci „Surface Integrals“ a podfunkci „Area-Weighted Average“.

METODA	$\alpha$ [°]	Q-ok	v-ok	ITER.	REZID.	$\Delta p_{TOT}$	$\Delta p_{STAT}$	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F_{xy}$ [N]	$F_{yz}$ [N]	VSTUP	VYSTUP
k-eps-std	35	OK	OK	408	0,0001	2385	2177	110,9	69,2	-0,06	130,7	130,7	MSFL	OUT
k-eps-std	16	OK	OK	680	0,0001	4684	4573	272,8	76,5	-0,01	283,3	283,3	MSFL	OUT
k-eps-std	16	OK	OK	696	0,0001	7093	7092	274,1	368,6	0,1	459,3	459,3	PRES	MSFL
k-eps-std	35	OK	OK	473	0,0001	2703	2705	111,1	364,2	0,01	380,8	380,8	PRES	MSFL
k-eps-std	75	OK	OK	180	0,001	8174	2332	174,6	142,8	-2,97	225,6	225,6	MSFL	OUT
k-eps-std	75	OK	OK	413	0,0001	7184	7204	172,5	426,2	-3,4	459,8	459,8	PRES	MSFL
k-eps-std	75	OK	OK	130	0,001	7166	7256	172,9	437,8	-0,47	470,7	470,7	MSFL	MSFL
k-eps-std	25	OK	OK	576	0,0001	3618	3430	194,7	91,9	0,05	215,3	215,3	MSFL	OUT
k-eps-std	63	OK	OK	797	0,0001	4924	3244	106,3	120,9	0,63	160,9	160,9	MSFL	OUT
k-eps-std	25	OK	OK	542	0,0001	6337	6339	242,5	402,4	0,02	469,8	469,8	PRES	MSFL
k-eps-std	63	OK	OK	277	0,0001	3504	3515	106,8	414,4	0,86	427,9	427,9	PRES	MSFL
k-eps-std	55	OK	OK	500	0,0001	3585	2573	106,5	108,5	-0,3	152,0	152,0	MSFL	OUT
k-eps-std	45	OK	OK	514	0,0001	3187	2634	115,4	96,2	0,1	150,2	150,2	MSFL	OUT
k-eps-std	45	OK	OK	472	0,0001	3137	3141	115,2	391,0	-0,07	407,6	407,6	PRES	MSFL
k-eps-std	55	OK	OK	312	0,0001	3167	3175	107,0	402,5	-0,15	416,5	416,5	PRES	MSFL
k-omg-std	16	OK	OK	1060	0,0001	8316	8319	322,1	373,9	0,05	493,5	493,5	PRES	MSFL
k-omg-std	63	OK	OK	777	0,0001	3824	3836	118,6	408,5	0,7	425,4	425,4	PRES	MSFL
k-omg-std	63	OK	OK	1489	0,0001	4628	2944	112,2	112,4	1,2	158,8	158,8	MSFL	OUT
k-omg-std	35	OK	OK	470	0,0001	3027	3031	123,1	364,5	1,37	384,7	384,7	PRES	MSFL
k-omg-std	25	OK	OK	1166	0,0001	5865	5875	225,9	390,1	-2,83	450,8	450,8	PRES	MSFL
k-eps-RNG	63	OK	OK	1500	0,001	3173	3194	97,6	408,1	1,98	419,6	419,6	PRES	MSFL
k-eps-RNG	25	OK	OK	443	0,0001	3745	3749	143,5	361,1	0,12	388,6	388,6	PRES	MSFL
k-omg-std	55	OK	OK	423	0,0001	3571	3586	122,0	404,7	-0,11	422,7	422,7	PRES	MSFL
k-omg-std	75	OK	OK	400	0,001	7564	7597	190,1	419,5	-3,5	460,6	460,6	PRES	MSFL
k-omg-std	45	OK	OK	412	0,001	3323	3333	123,2	390,1	0,2	409,1	409,1	PRES	MSFL
k-omg-std	25	OK	OK	596	0,0001	4056	3866	228,0	98,0	0,15	248,2	248,2	MSFL	OUT
k-eps-RNG	45	OK	OK	1532	0,0001	2588	2598	95,8	374,1	-0,07	386,2	386,2	PRES	MSFL
k-eps-RNG	25	OK	OK	1200	0,001	3041	2702	145,4	66,7	0,005	160,0	160,0	MSFL	OUT
k-omg-std	45	OK	OK	650	0,001	3257	2702	122,8	96,1	0,16	155,9	155,9	MSFL	OUT
k-omg-std	75	OK	OK	850	0,001	8439	2606	191,9	131,5	-3,1	232,6	232,7	MSFL	OUT
k-eps-RNG	75	OK	OK	650	0,001	6500	6535	156,6	424,8	-8,4	452,7	452,8	PRES	MSFL
k-omg-std	55	OK	OK	1253	0,0001	3697	2681	114,2	109,0	-0,48	157,9	157,9	MSFL	OUT
k-omg-std	35	OK	OK	180	0,001	2523	2320	123,9	70,7	-0,09	142,7	142,7	MSFL	OUT
k-eps-RNG	55	OK	OK	963	0,0001	3336	2318	93,5	101,3	-0,5	137,9	137,9	MSFL	OUT
k-omg-std	16	OK	OK	3100	0,001	5281	5169	320,6	82,3	0,7	331,0	331,0	MSFL	OUT

Obr. 4.3 Vypočtené hodnoty pro různé úhly otevření talíře klapky, modely a metody

### ❖ Vysvětlivky

- k-eps-std – Byla použita metoda k- $\epsilon$  standard
- k-eps-RNG – Byla použita metoda k- $\epsilon$  RNG
- k-omg-std – Byla použita metoda k- $\omega$  standard
- Q-ok – Kontrola průtoku, jestli je vstupní průtok roven výstupním průtoku
- v-ok – Kontrola rychlostí, jestli je vstupní rychlost rovna výstupní rychlosti
- ITER. – Počet iterací po kterých výpočet konvergoval
- REZID. – Přesnost reziduálů

- $\Delta p_{ZTOT}$  – Tlaková ztráta (Totální tlak)
- $\Delta p_{ZSTAT}$  – Tlaková ztráta (Statický tlak)
- $F_x, F_y, F_z$  – Síly působící na talíř klapky
- $F_{xy}, F_{xyz}$  – Výslednice těchto sil
- PRES – Okrajová podmínka Pressure-Inlet
- MSFL – Okrajová podmínka Mass-Flow-Inlet
- OUT – Okrajová podmínka Outflow

Pro tuto úlohu se model k- $\epsilon$  RNG ukázal jako nevhodný, protože dokázal spočítat jen velmi málo úloh, které konvergovaly. Zbylé dva dvourovnicové modely se ukázaly jako úspěšné. Avšak u některých výpočtů pro úspěšnou konvergenci bylo nutno zmenšit přesnost reziduálů na hodnotu  $10^{-3}$ . Co se týče okrajových podmínek, tak ve srovnání s dodanými daty z měření od firmy Armatury Group se ukázala přesnější vstupní okrajová podmínka Pressure-Inlet s výstupní okrajovou podmínkou Mass-Flow-Inlet, a proto byly do grafického vyhodnocení pouze použity data s těmito okrajovými podmínkami.

## 5. GRAFICKÉ SHRUTÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÝCH VÝPOČTŮ

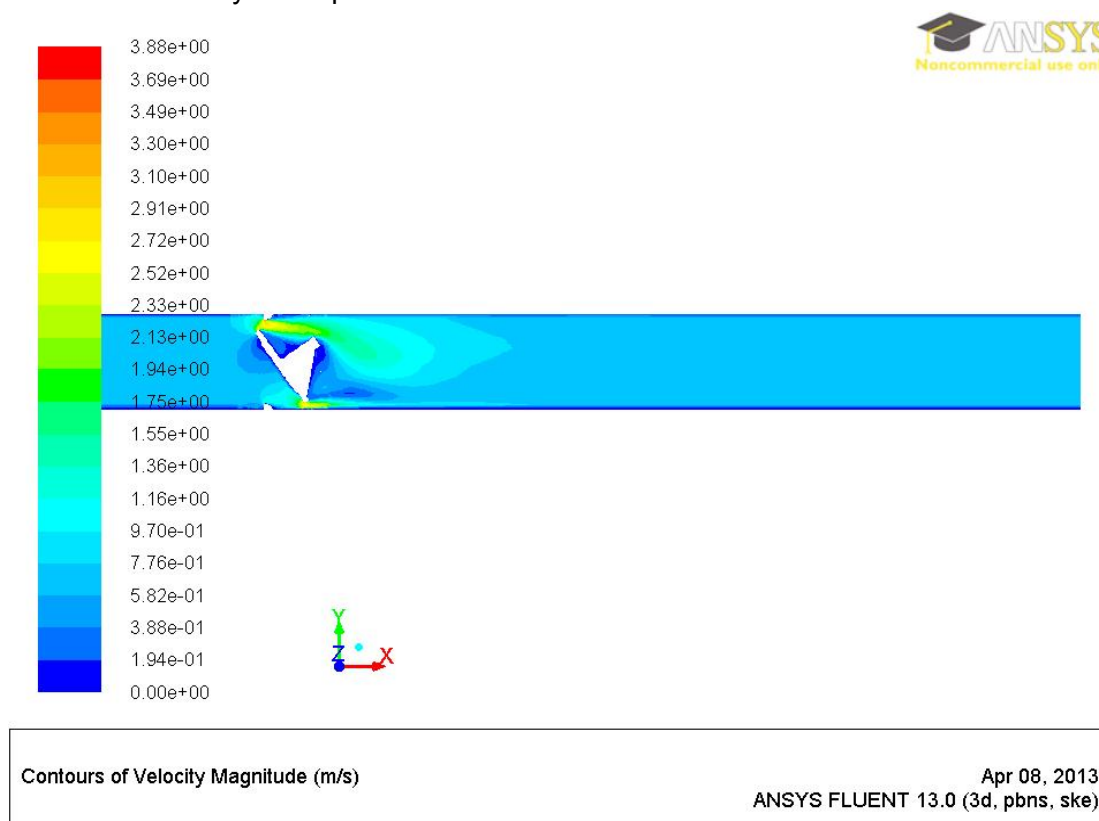
Grafické shrnutí zobrazuje výsledky numerického výpočtu nebo výsledky, které byly vyhodnoceny na základě hodnot z numerického výpočtu. Můžeme zde zahrnout grafické výsledky proudění z programu Ansys Fluent, porovnání ztrátového součinitele s měřenými hodnotami a vyhodnocení výsledné síly působící na talíř klapky.

### 5.1 Grafické výsledky proudění

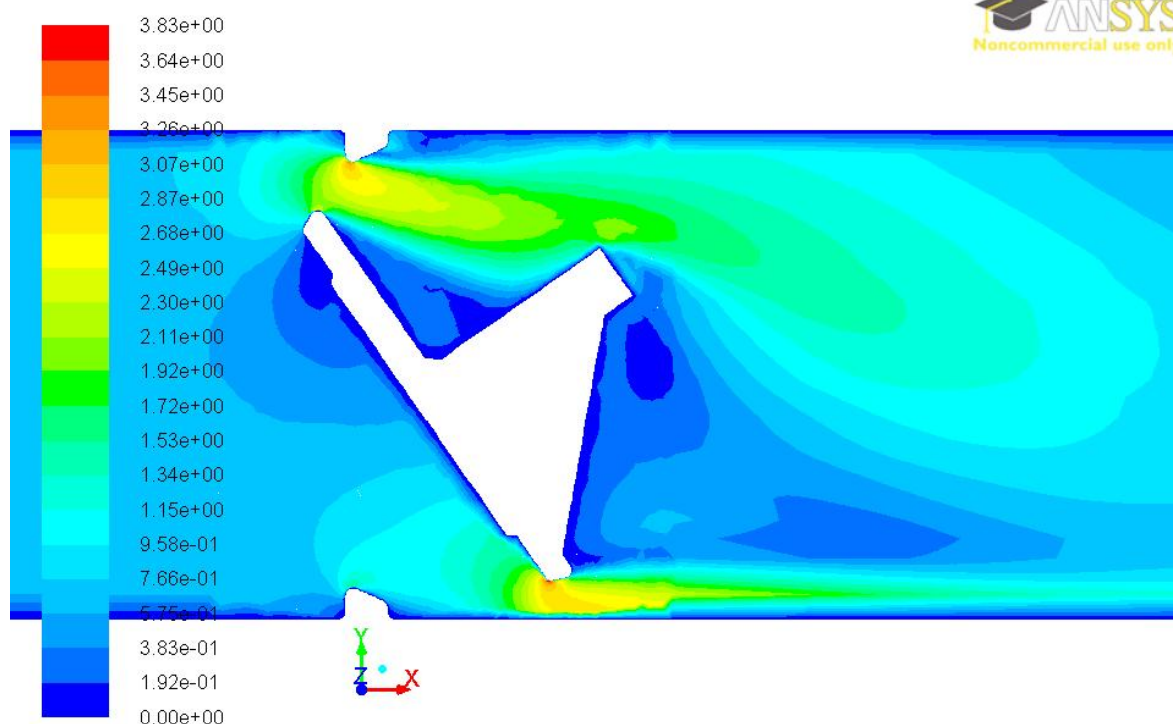
Grafické vyhodnocení proudového pole bylo provedeno programem Ansys Fluent. Program nabízí po dokončení výpočtu zobrazení vybraných veličin v daném řezu zkoumaného prvku. V případě zpětné klapky to je řez osovou rovinou zpětné klapky, vstupního a výstupního potrubí. Vyhodnocení se týká zejména rychlosti proudění média a statického tlaku. Z důvodu značného počtu obrázků, které by navýšily počet stran diplomové práce na nepřijatelnou hodnotu, zde jsou zobrazeny pouze výsledky pro jeden úhel otevření, který je spočten oběma dvourovnicovými modely. Zbylé grafické výsledky jsou umístěny na příloženém CD.

#### 5.1.1 Grafické výsledky proudění pro úhel otevření 35° a metodu k-ε standard

- Rychlost proudění



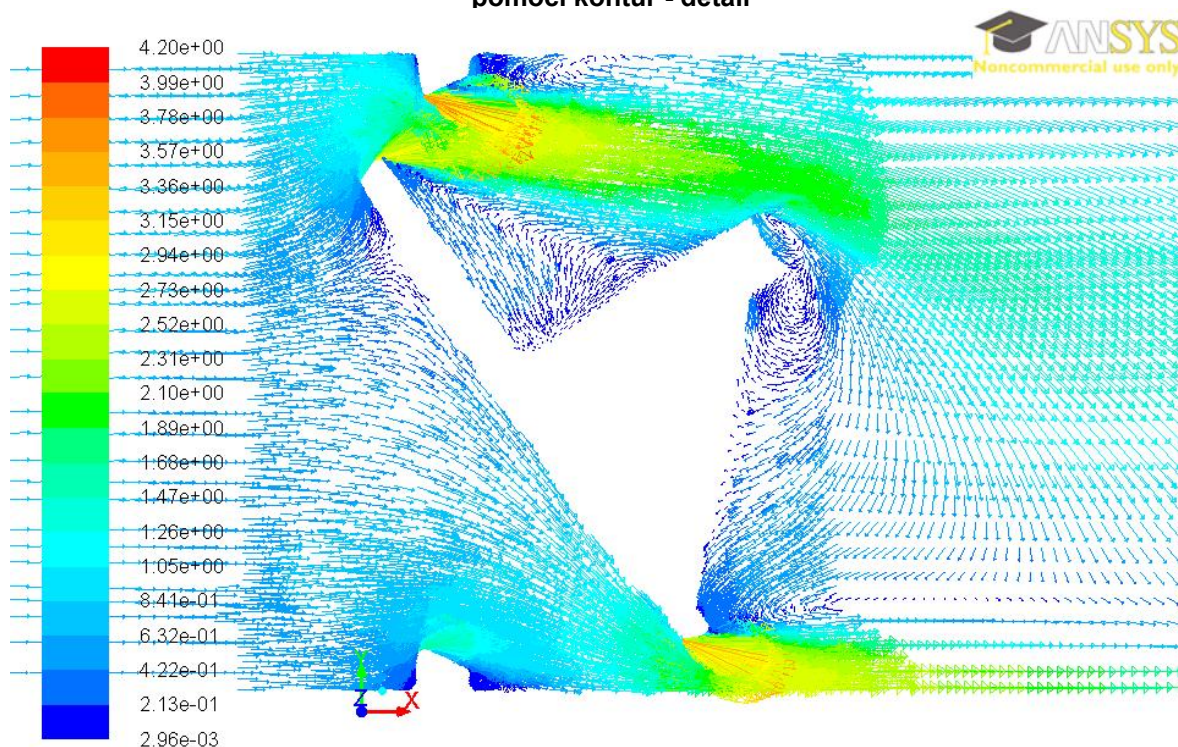
Obr. 5.1 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky  
pomocí kontur – celá sestava



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Apr 08, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, skw)

**Obr. 5.2 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky pomocí kontur - detail**



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

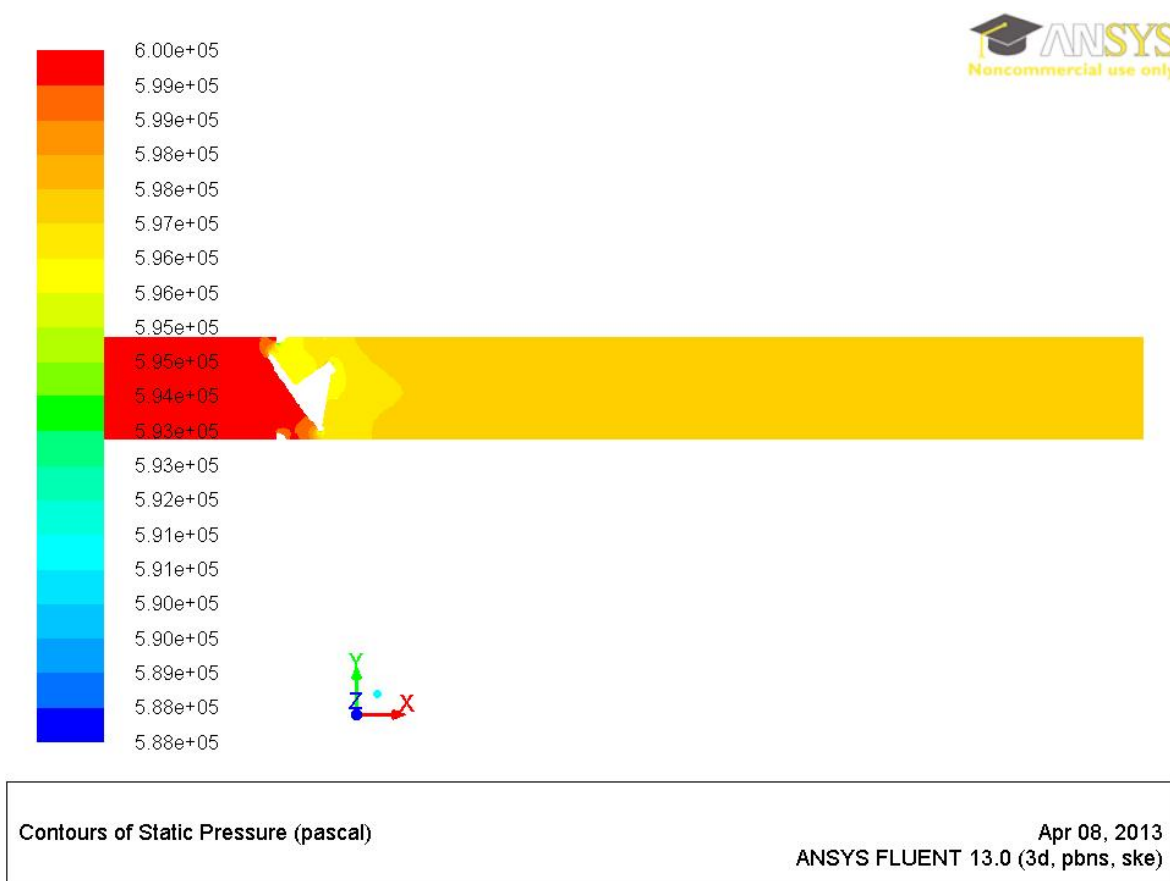
Apr 08, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske)

**Obr. 5.3 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky pomocí vektorů - detail**



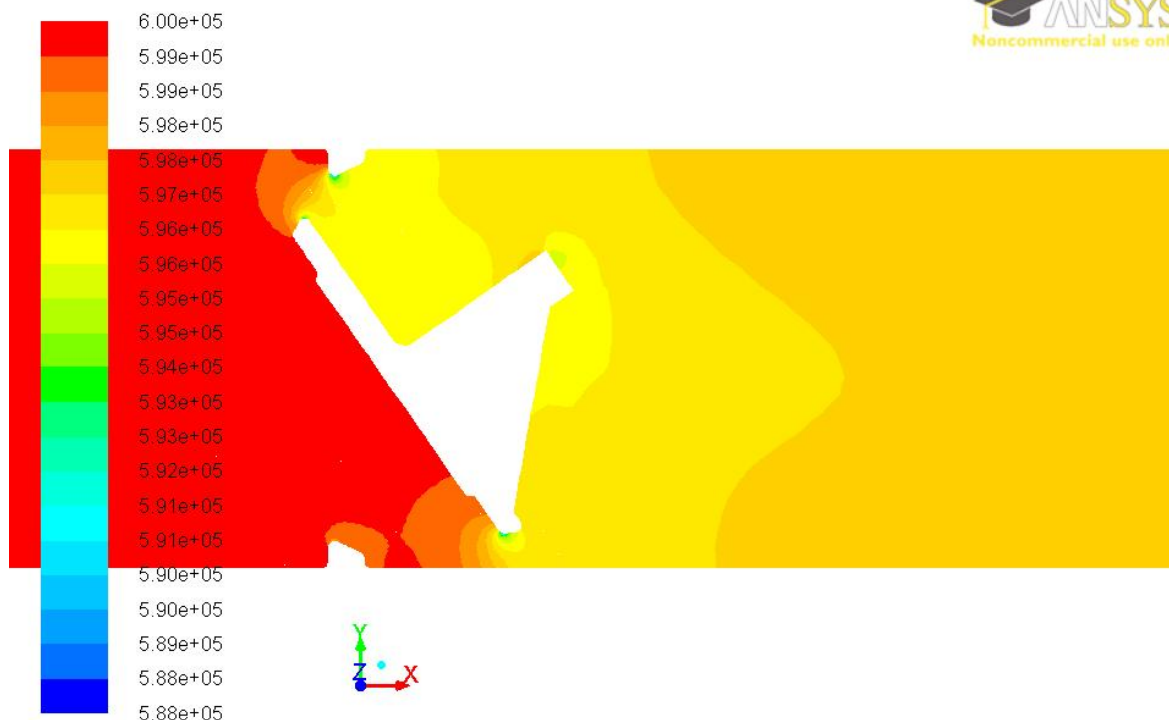
Z obrázku 5.1 je patrné, že grafické výsledky numerického výpočtu jsou totožné s teoretickými předpoklady, tedy že nejvyšší rychlost proudění v potrubí je v jeho středu a naopak nejnižší u stěn potrubí. Nejvyšší rychlosti proudění dosahuje proudící médium v mezeře mezi hranou talíře klapky a stěnou (drážkou) tělesa zpětné klapky, což můžeme vidět na obrázku 5.2. Rychlost proudícího média v tomto případě měla být konkrétně  $0,68 \text{ m.s}^{-1}$ , což je přepočteno ze zadaného hmotnostního průtoku. Na obrázku si můžeme všimnout, že odstín barevného spektra uprostřed potrubí odpovídá dané hodnotě na rychlostní stupnici. Na obr. 5.3, kde je rychlost proudění zobrazena pomocí vektorů, lze také vidět, že v prostoru za zpětnou klapkou dochází ke zpětnému proudění.

- Statický tlak



**Obr. 5.4 Grafické zobrazení statického tlaku pomocí kontur – celá sestava**





Contours of Static Pressure (pascal)

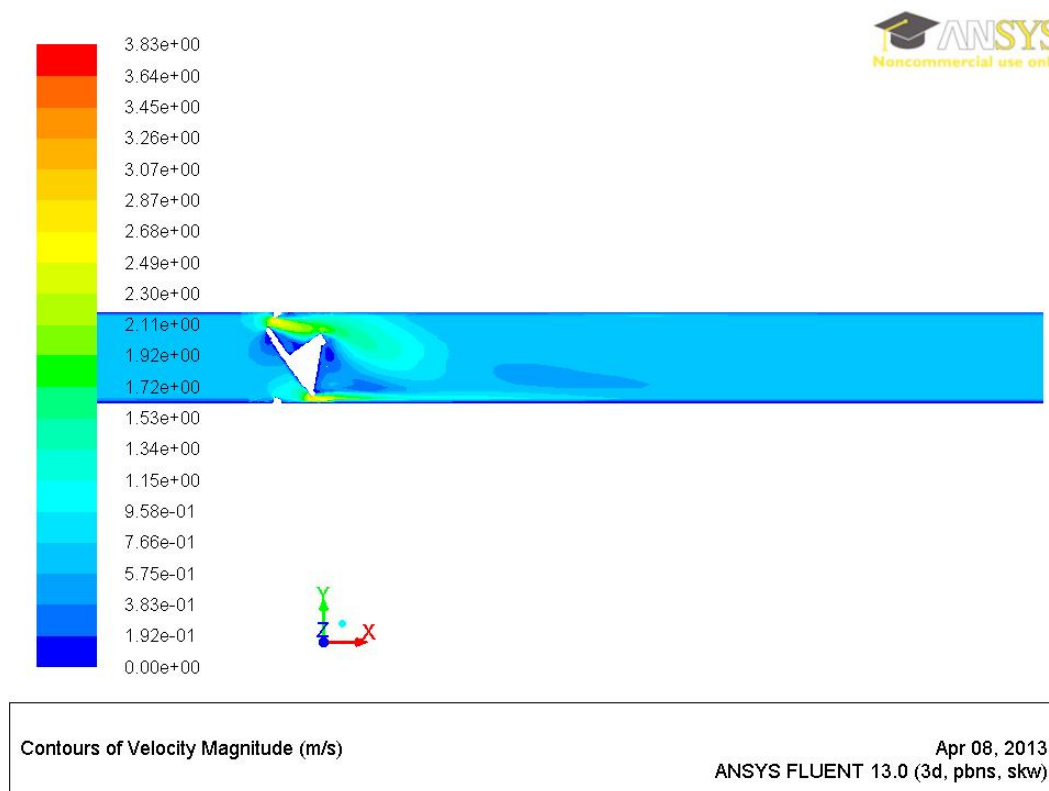
Apr 08, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske)

**Obr. 5.5 Grafické zobrazení statického tlaku pomocí kontur - detail**

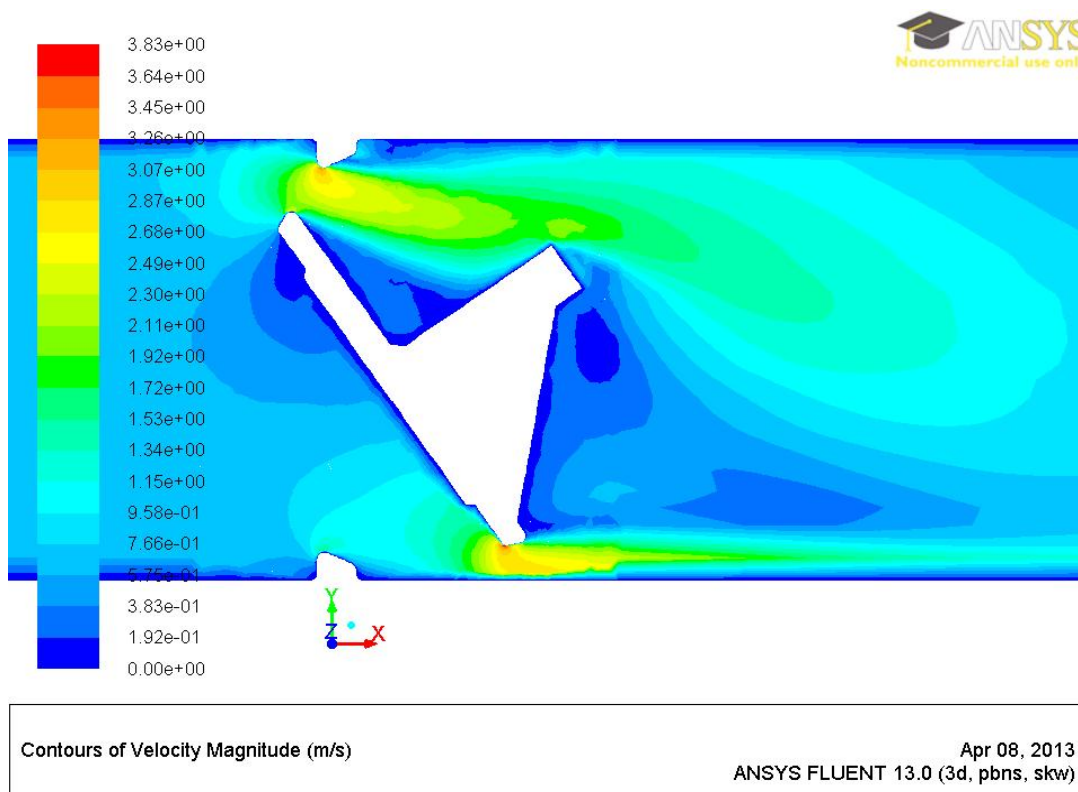
Na obrázcích 5.4 a 5.5 je patrné, že statický tlak na začátku vstupního potrubí, tedy vstupu, odpovídá hodnotě  $6 \cdot 10^5$  Pa, což odpovídá zadané hodnotě do okrajové podmínky Pressure-Inlet. Ke vzniku nejnižších hodnot statického tlaku dochází podobně jako u rychlosti proudění v mezeře mezi hranou talíře klapky a stěnou (drážkou) tělesa zpětné klapky, což lze dobře vidět na obrázku 5.5. Na obrázku 5.4 můžeme také pozorovat určitý tlakový spád (ztrátu) na celé délce sestavy. Hodnotu této tlakové ztráty dostaneme, když odečteme patřičné hodnoty barevného spektra od sebe, tedy nejvyšší hodnotu zobrazenou červenou barvou a hodnotu na konci potrubí, která je zobrazena barvou tmavě žlutou. Vzhledem k vysokým hodnotám přetlaku před klapkou lze také říci, že v prostorách kolem talíře zpětné klapky nevzniká kavitace.

## 5.1.2 Grafické výsledky proudění pro úhel otevření 35° a metodu k- $\omega$ standard

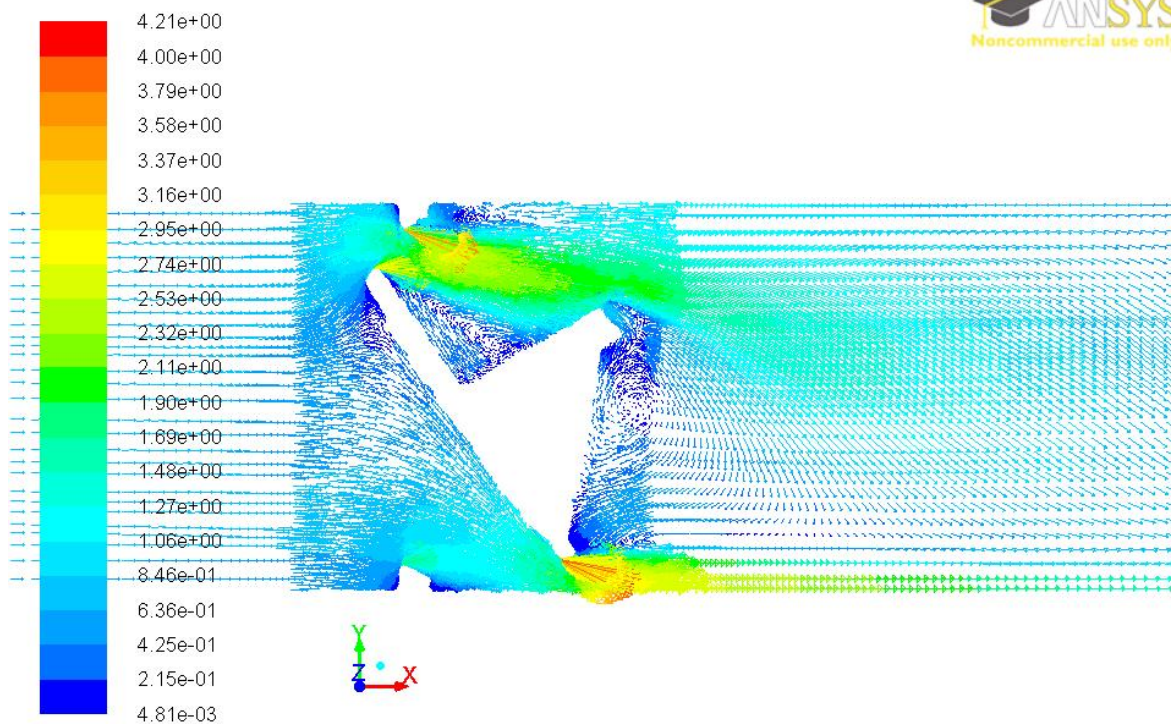
- Rychlost proudění



**Obr. 5.6 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky pomocí kontur – celá sestava**



**Obr. 5.7 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky pomocí kontur - detail**



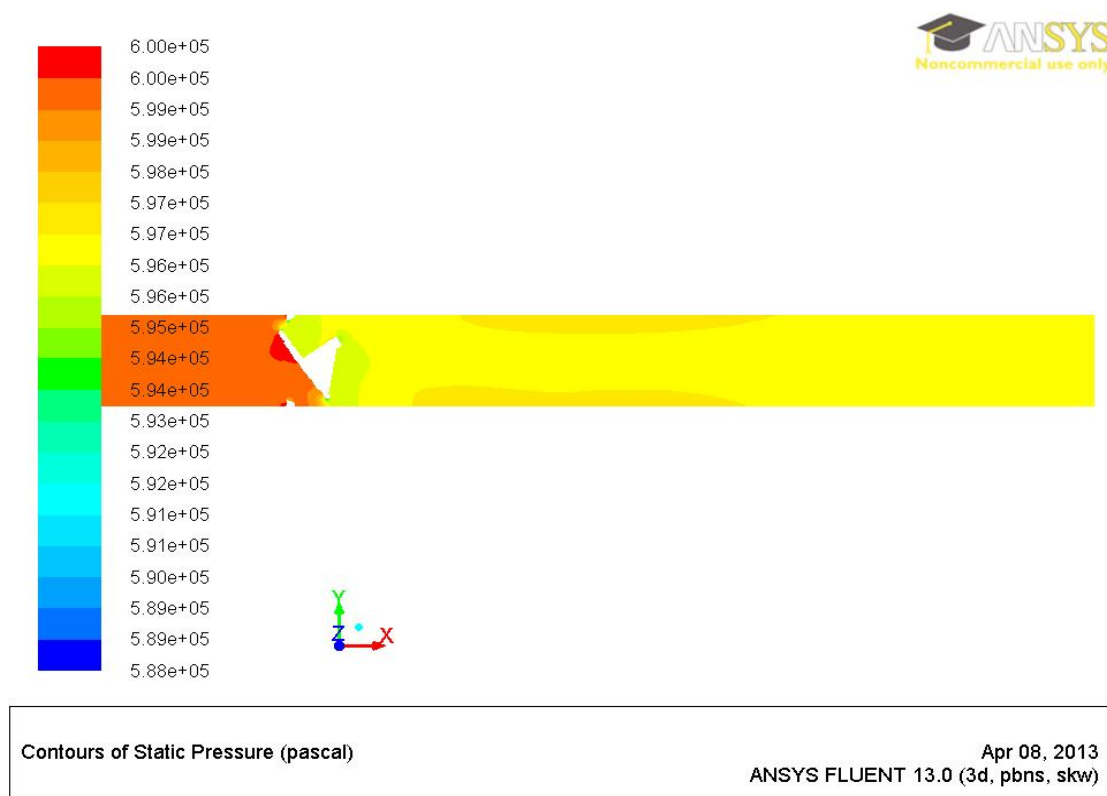
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Apr 08, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, skw)

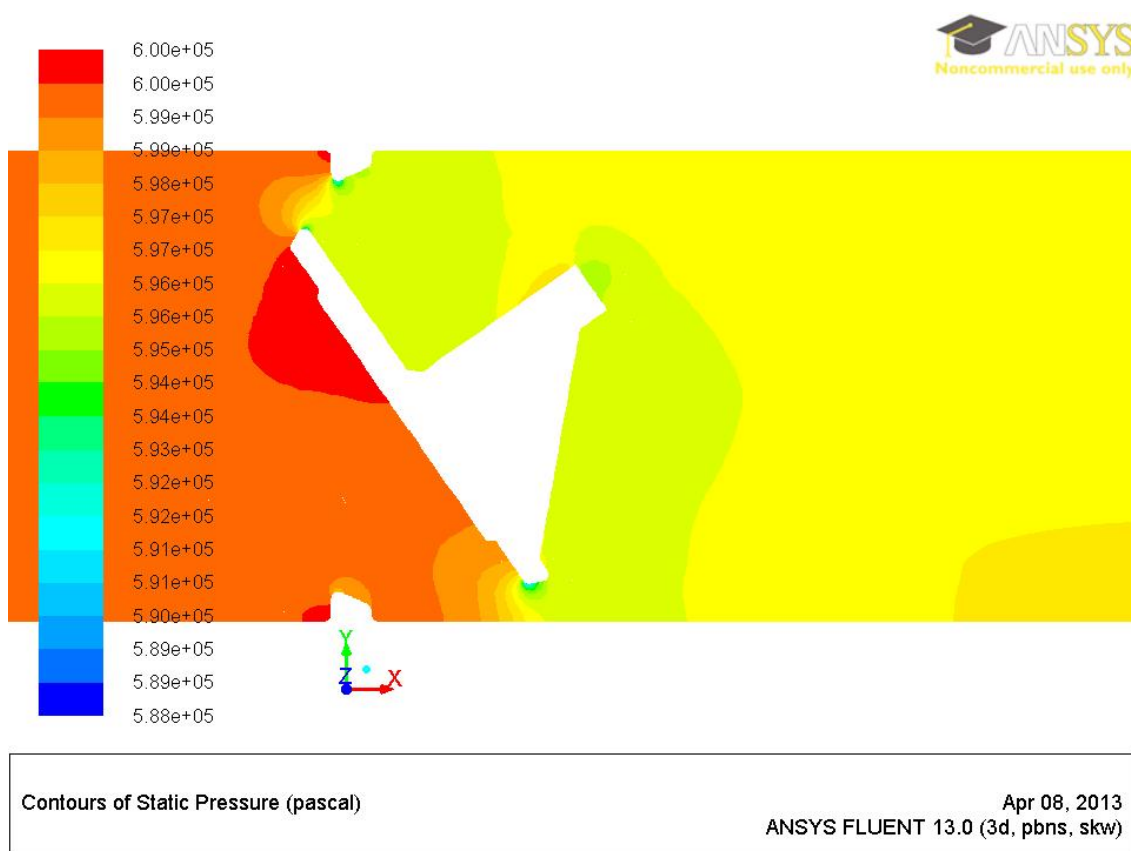
**Obr. 5.8 Grafické zobrazení rychlosti proudění kolem zpětné klapky pomocí vektorů - detail**

Zhodnocení výsledků rychlosti proudění pro metodu  $k-\omega$  standard je totožné jako pro metodu  $k-\epsilon$  standard. Jsou zde ale patrné odlišnosti proudění, které lze vidět pomocí barevného spektra. Tyto odlišnosti jsou zejména dány tím, že každý model je definován jinak. Protože výsledky modelu  $k-\omega$  standard se více blíží hodnotám z praktického měření, lze říci, že tento dvourovnicový model je o něco málo přesnější pro tuto úlohu, než model  $k-\epsilon$  standard.

- Statický tlak



**Obr. 5.9 Grafické zobrazení statického tlaku – celá sestava**



**Obr. 5.10 Grafické zobrazení statického tlaku – detail kolem talíře klapky**

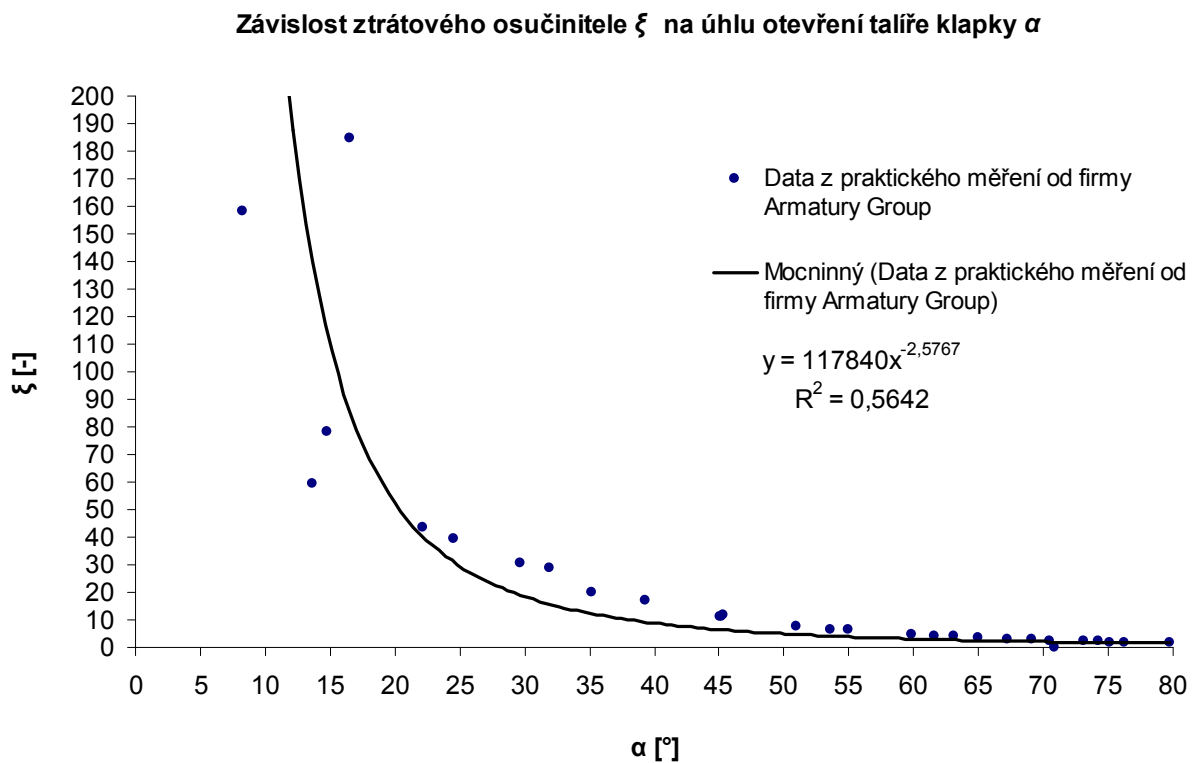
Vyhodnocení statického tlaku pro dvourovnicový model k- $\omega$  standard je trochu odlišné ve srovnání podle metody k- $\epsilon$  standard. První patrná odlišnost je hned u tlakového spádu. V tabulce vypočtených hodnot je patrné, že u tohoto modelu je tlakový spád vyšší zhruba o 300 Pa. To je dáno odlišnou definicí modelu, ale tato hodnota se více blíží reálné naměřené hodnotě. Další odlišnost je patrná na grafickém zobrazení. Zde je nejtmavší červená, která má hodnotu  $6 \cdot 10^6$  Pa, zobrazená až na ploše talíře klapky i přes to, že tato hodnota byla již definována na vstupu okrajovou podmínkou Pressure-Inlet.

## **5.2 Závislost ztrátového součinitele na úhlu otevření talíře klapky**

Grafické výsledky a hodnocení se liší v závislosti na úhlu otevření talíře klapky. Všechny tyto obrázky zde nelze zobrazit a hodnotit. Určitá forma hodnocení a porovnání může být sestavení závislosti ztrátového součinitele na úhlu otevření klapky a porovnání s hodnotami vypočtenými z praktického měření.

Zpráva o měření od firmy Armatury Group obsahuje také data, podle kterých byl ve zprávě vypočten ztrátový součinitel pro každý úhel otevření talíře klapky. Z těchto dat jsem v programu Excel vytvořil bodový graf, viz obr. 5.11, kterým jsem proložil spojnici trendu. Naměřená data mají značný rozptyl zejména pro malé úhly otevření a bylo obtížné vybrat nejvhodnější spojnici trendu u zadaných dat tak, aby bylo dosaženo vyšší hodnoty spolehlivosti  $R$ . Spojnice trendu je nejpřesnější v případě, že se hodnota spolehlivosti blíží nebo rovná hodnotě 1. Je také známá jako koeficient spolehlivosti.

Tento graf slouží jako základ pro porovnání s vypočtenými hodnotami z programu Ansys Fluent.



**Obr. 5.11 Sestrojená závislost ztrátového součinitele  $\xi$  na úhlu otevření talíře klapky  $\alpha$  dle dodaných dat z měření**

V programu Excel jsem zapsal všechny potřebná data z numerického výpočtu a vytvořil tabulky pro dvourovnicový model  $k$ - $\omega$  standard a  $k$ - $\epsilon$  standard. Každá tabulka obsahuje data pro statický a celkový tlak. Po zapsání dat jsem vypočetl Reynoldsovo číslo (5.1) a ztrátový součinitel (5.2). Výpočet těchto dvou veličin jsem provedl podle vzorců uvedených v dodaných materiálech.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (5.1)$$

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_z}{\rho v^2} \quad (5.2)$$

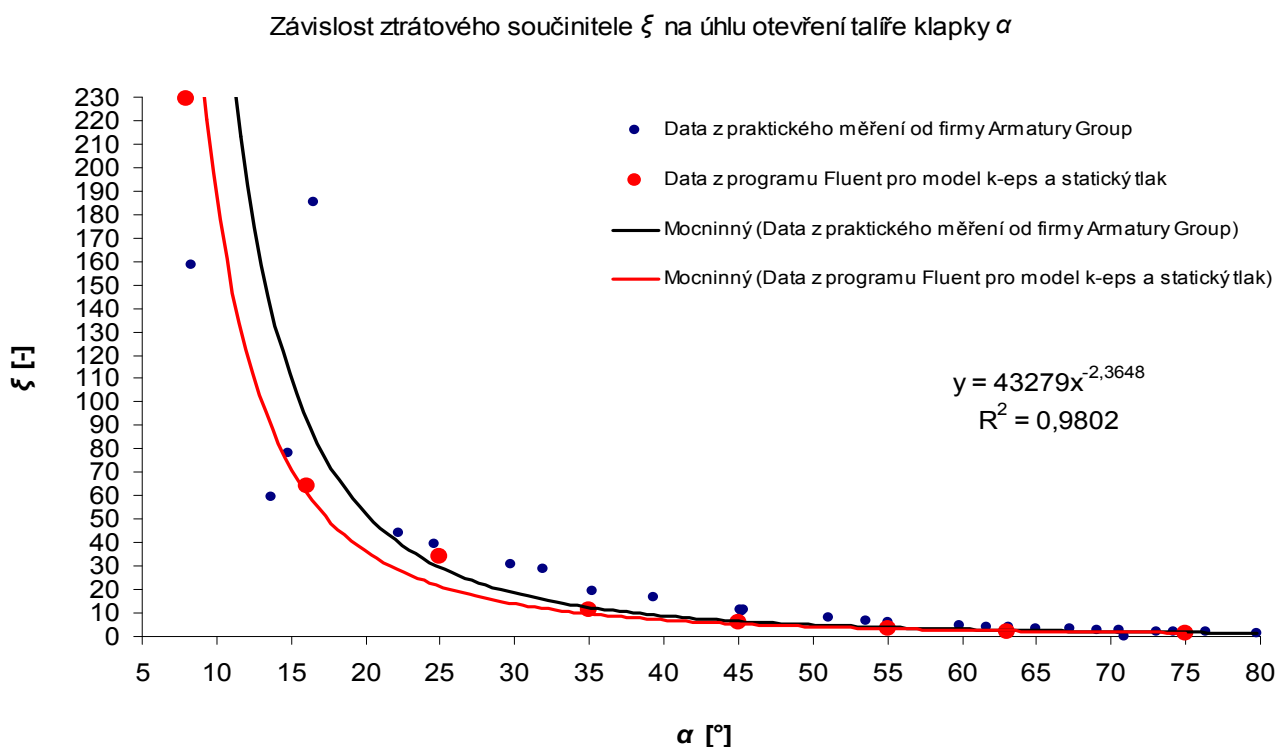
- Tabulka pro model k- $\epsilon$  standard

<b>k-<math>\epsilon</math> standard</b>							
TOTÁLNÍ TLAK	$\alpha$ [°]	$\Delta p_z$ [Pa]	$Q$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$v$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\xi$ [-]	Re [-]	Odchylka [%]
	8	13235,3	0,01668971	0,34	228,9844	6,54E+04	23,80
	16	7101,7	0,02307107	0,47	64,29787	9,04E+04	59,34
	25	6379,4	0,0299433	0,61	34,28863	1,17E+05	12,90
	35	2703,6	0,03337942	0,68	11,69377	1,31E+05	40,71
	45	3138,1	0,05154175	1,05	5,692698	2,02E+05	50,63
	55	3163,6	0,06970409	1,42	3,137869	2,73E+05	49,60
	63	3526,6	0,08982991	1,83	2,106124	3,52E+05	49,44
	75	7183,7	0,16787886	3,42	1,228361	6,58E+05	35,77
STATICKÝ TLAK	$\alpha$ [°]	$\Delta p_z$ [Pa]	$Q$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$v$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\xi$ [-]	Re [-]	Odchylka [%]
	8	13238,7	0,01668971	0,34	229,0433	6,54E+04	23,82
	16	7101,7	0,02307107	0,47	64,29787	9,04E+04	59,34
	25	6379,4	0,0299433	0,61	34,28863	1,17E+05	12,89
	35	2703,6	0,03337942	0,68	11,69377	1,31E+05	40,70
	45	3138,1	0,05154175	1,05	5,692698	2,02E+05	50,62
	55	3163,6	0,06970409	1,42	3,137869	2,73E+05	49,59
	63	3526,6	0,08982991	1,83	2,106124	3,52E+05	49,44
	75	7183,7	0,16787886	3,42	1,228361	6,58E+05	35,76

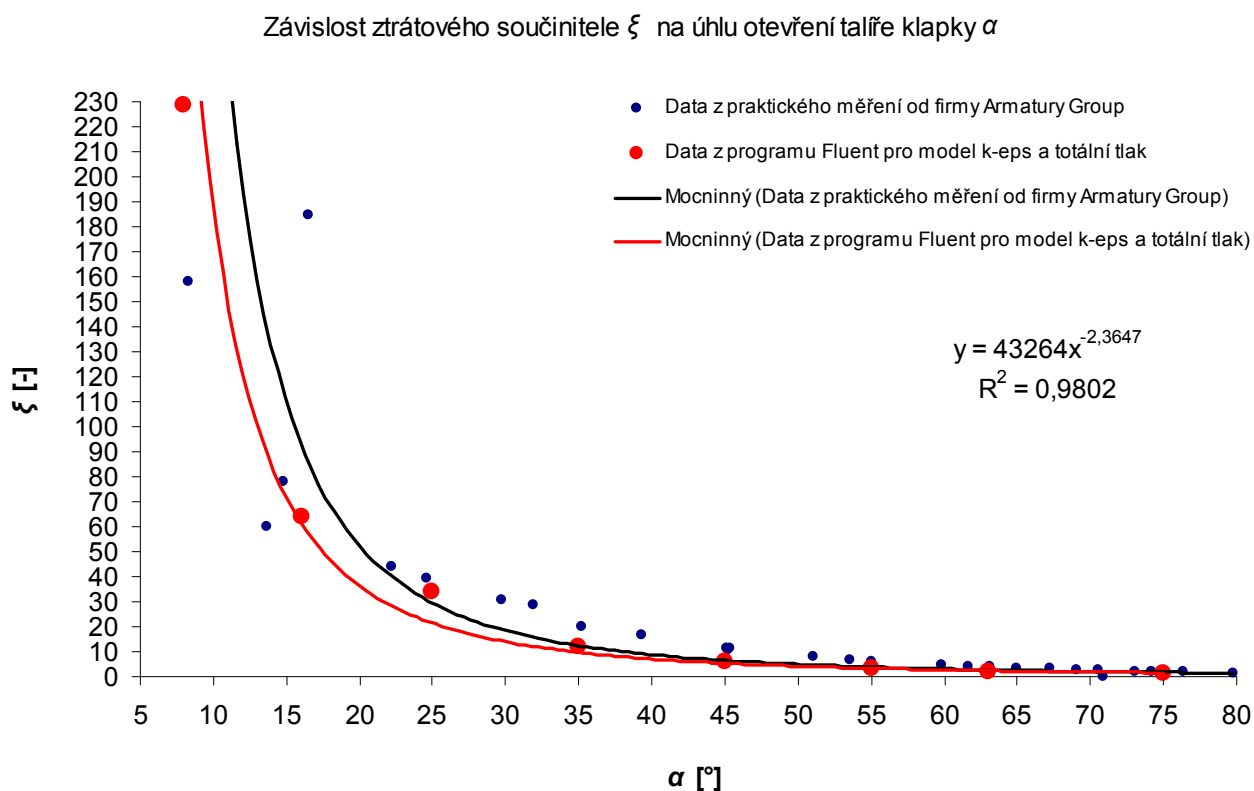
- Tabulka pro model k- $\omega$  standard

<b>k-<math>\omega</math> standard</b>							
TOTÁLNÍ TLAK	$\alpha$ [°]	$\Delta p_z$ [Pa]	$Q$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$c$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\xi$ [-]	Re [-]	Odchylka [%]
	8	14963,2	0,01669	0,34	258,8789	6,54E+04	39,95
	16	8319,8	0,023071	0,47	75,32639	9,04E+04	52,36
	25	5874,1	0,029943	0,61	31,5727	1,17E+05	19,79
	35	3034,4	0,033379	0,68	13,12457	1,31E+05	33,45
	45	3465,5	0,051542	1,05	6,286621	2,02E+05	45,47
	55	3533,2	0,069704	1,42	3,504463	2,73E+05	43,7
	63	4537	0,08983	1,83	2,709546	3,52E+05	34,95
	75	7590,7	0,167879	3,42	1,297955	6,58E+05	32,12
STATICKÝ TLAK	$\alpha$ [°]	$\Delta p_z$ [Pa]	$Q$ [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	$c$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\xi$ [-]	Re [-]	Odchylka [%]
	8	14969,4	0,01669	0,34	258,9862	6,54E+04	40,01
	16	8319,8	0,023071	0,47	75,32639	9,04E+04	52,36
	25	5874,1	0,029943	0,61	31,5727	1,17E+05	19,79
	35	3034,4	0,033379	0,68	13,12457	1,31E+05	33,45
	45	3465,5	0,051542	1,05	6,286621	2,02E+05	45,47
	55	3533,2	0,069704	1,42	3,504463	2,73E+05	43,70
	63	4537	0,08983	1,83	2,709546	3,52E+05	34,95
	75	7590,7	0,167879	3,42	1,297955	6,58E+05	32,12

Po vypočtení těchto potřebných dat jsem rovněž sestrojil čtyři bodové grafy (pro každý tlak jeden), kterými jsem proložil spojnicí trendu a porovnal každý graf s původním sestrojeným grafem s naměřených hodnot.



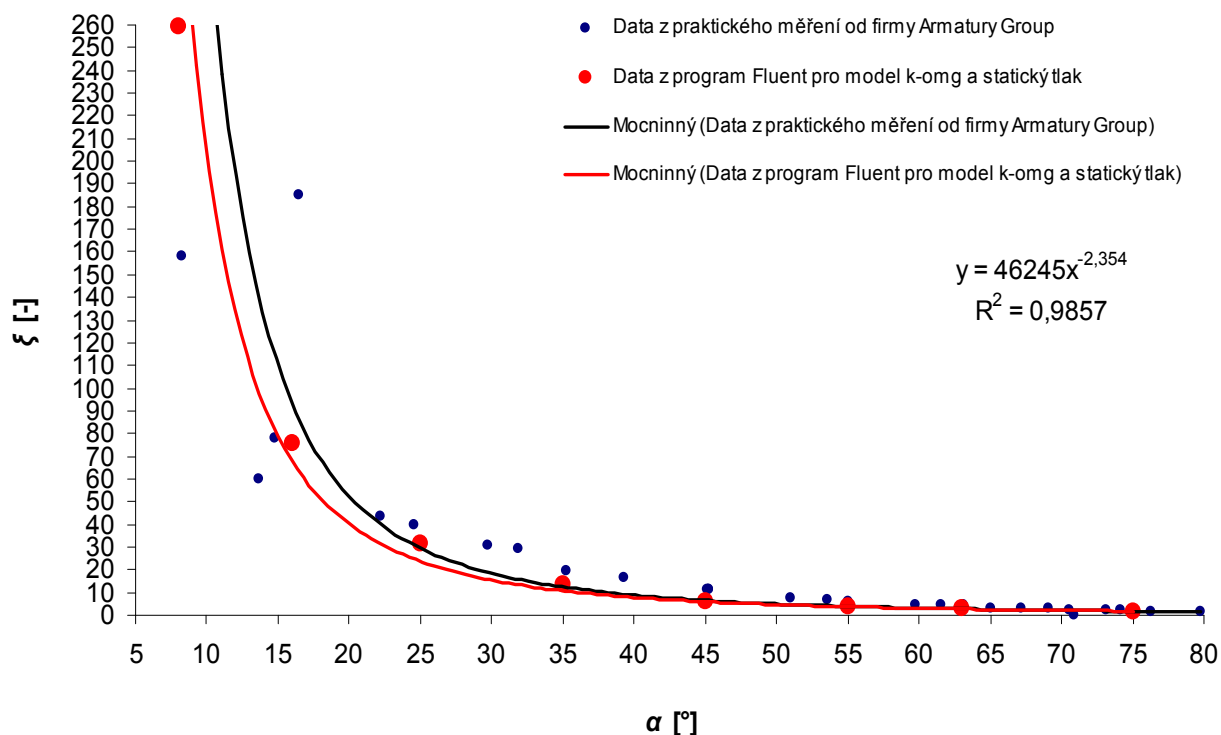
Obr. 5.12 Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  vypočteného ze statického tlaku modelu k- $\epsilon$  standard



Obr. 5.13 Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  vypočteného z totálního tlaku modelu k- $\epsilon$  standard

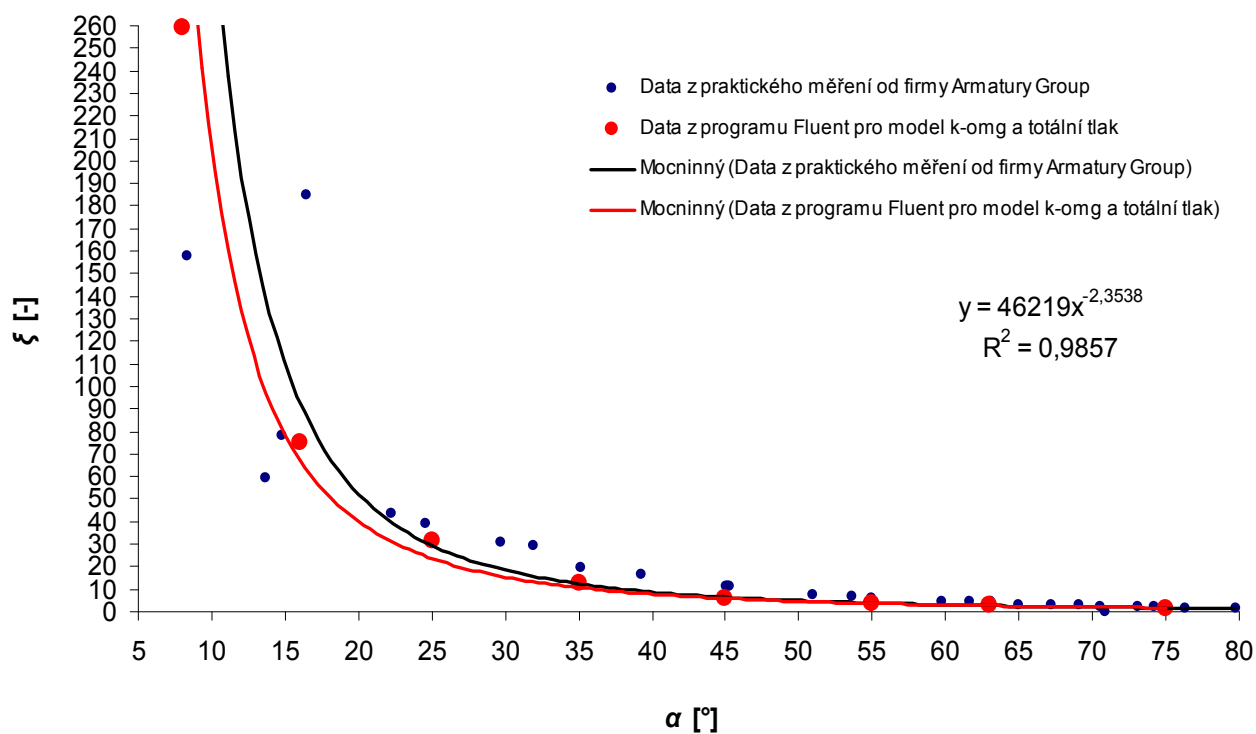


Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  na úhlu otevření talíře klapky  $\alpha$



**Obr. 5.14 Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  vypočteného ze statického tlaku modelu k- $\omega$  standard**

Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  na úhlu otevření talíře klapky  $\alpha$



**Obr. 5.15 Závislost ztrátového součinitele  $\xi$  vypočteného z totálního tlaku modelu k- $\omega$  standard**

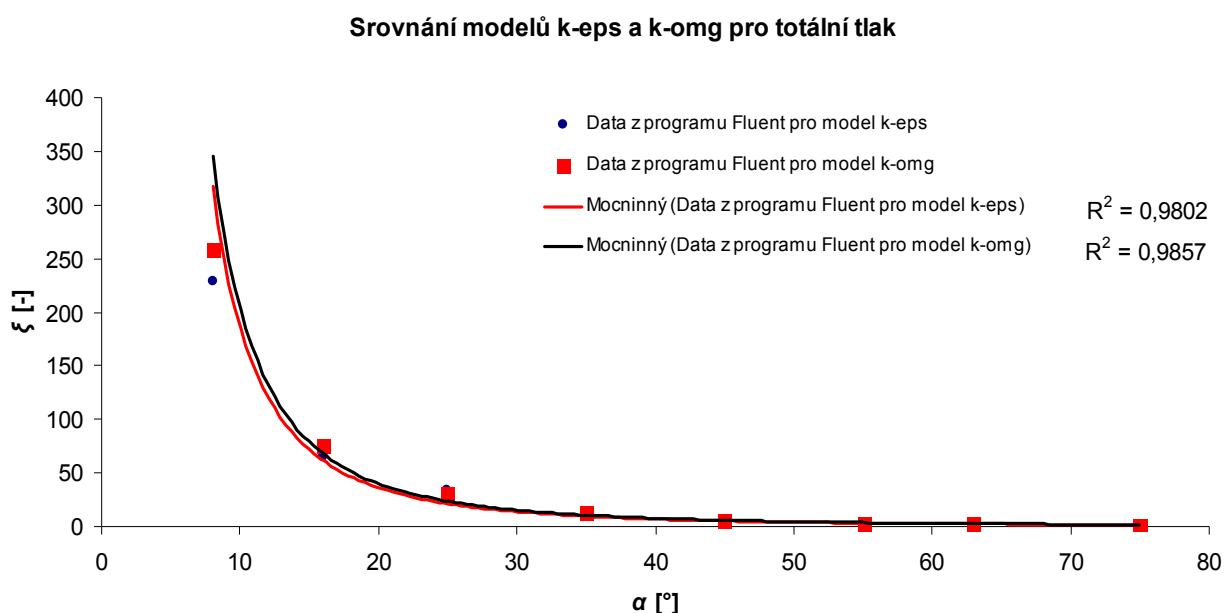
Z těchto čtyř grafů je patrné, že ani v jednom případě vypočtení ztrátového součinitele z numerického modelování nedosahují hodnot ztrátových součinitelů vypočtených z praktického měření. Důvodem této nepřesnosti může být zejména to, že praktické měření bylo prováděno jako dynamické. Tedy talíř škrtkící klapky byl otevírán a zavírán a při tom byla měřena data. Kdežto numerické modelování v programu Ansys Fluent je provedeno jako úloha statická, kde talíř zpětné klapky je pevně uchycen a nehýbe se.

Při porovnání proložených spojnic trendu si můžeme všimnout, že proložená spojnice trendu pro vypočtené hodnoty z numerického modelování daleko lépe kopíruje dané body a má vysokou hodnotu spolehlivosti. Zatímco některé body vypočtené z praktického měření leží viditelně mimo spojnic trendu a z tohoto důvodu se hodnota spolehlivosti spojnice trendu značně snižuje.

Ve zprávě o měření dodanou firmou Armatury Group je také zmínka o nepřesnosti praktického měření, která může dosahovat  $\pm 16\%$ . Za předpokladu, že již do programu Ansys Fluent byly zadávány hodnoty s takto vysokou chybou se nelze divit, že odchylka ztrátového součinitele vypočteného z numerického modelování oproti ztrátovému součiniteli z měření dosahuje v některých případech až  $60\%$ .

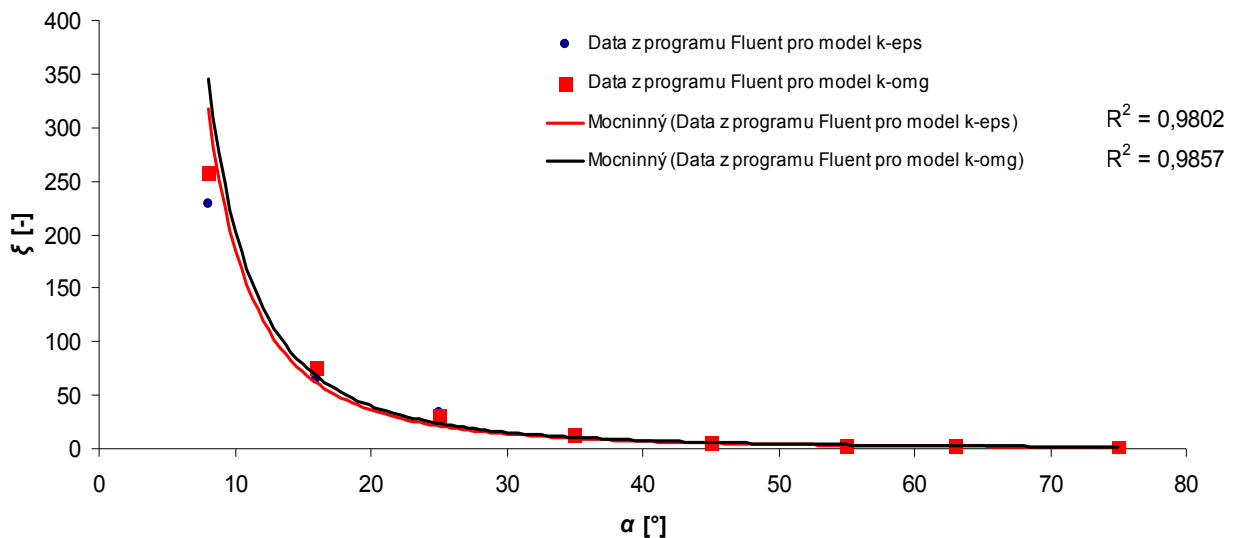
### 5.2.1 Srovnání ztrátových součinitelů dle jednotlivých tlaků

Pro bližší určení, který model více odpovídá naměřeným hodnotám, jsem provedl srovnání statického a totálního tlaku pomocí grafů.



**Obr. 5.16 Srovnání dvourovnicových modelů pro totální tlak**

### Srovnání modelů k-eps a k-omg pro statický tlak



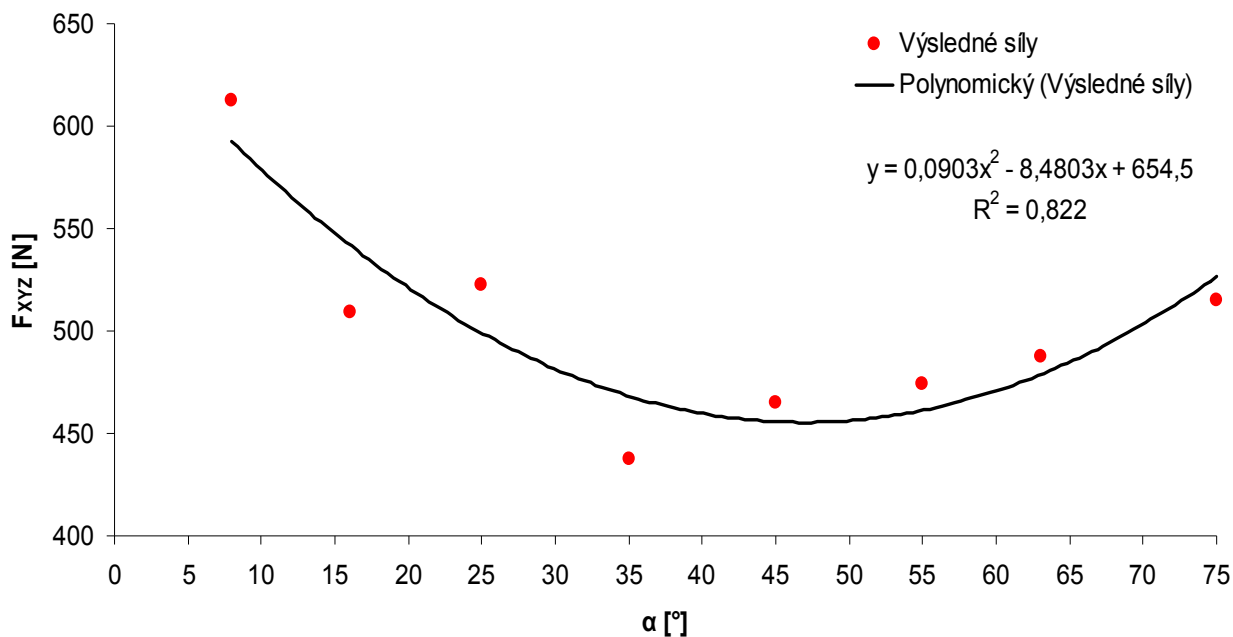
**Obr. 5.17 Srovnání dvou rovnicových modelů pro statický tlak**

Z grafů lze říci, že oba výsledky vypočtené pomocí obou dvou dvourovnicových modelů jsou téměř totožné. Přesto je zde zejména v menších úhlech otevření talíře klapky vidět rozdíl. Rozdíl můžeme vidět i v zobrazených hodnotách spolehlivosti. Z těchto dvou důvodů lze usoudit, že model k- $\omega$  standard je vhodnější a také o něco přesnější.

### 5.3 Vyhodnocení sil působících na talíř zpětné klapky

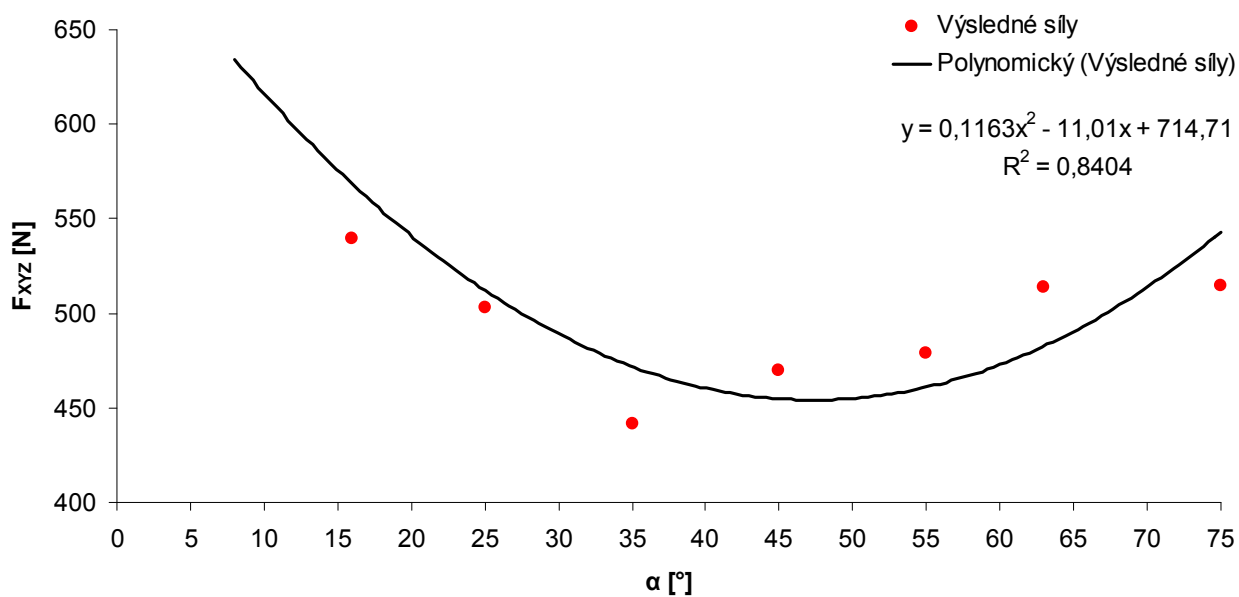
Při obtékání zpětné klapky, respektive talíře zpětné klapky kapalinou vznikají hydraulické síly, které působí na talíř zpětné klapky. Tyto síly byly automaticky vyhodnoceny programem Ansys Fluent po dokončení numerického výpočtu a to jako síly působící v ose x, y a z. Tyto síly jsem zapsal a vyhodnotil jejich výslednici, viz obr. 4.3. Největší působení bylo zaznamenáno ve směru proudění kapaliny, tedy ose x a v ose kolmé na osu x, tedy y. Síly působící v ose z byly velmi malé, řádově desetiny nebo setiny N. Jen zřídka se dostaly do hodnot jednotek. Proto by se dalo říci, že tyto síly nemají žádný vliv na výslednou sílu působící na talíř klapky, ale pro úplnost jsou zahrnuty do výpočtu výsledné síly. Graf závislosti výsledné síly působící na talíř klapky je zobrazen na obr. 5.18 a 5.19. Grafy jsou sestaveny pro každý dvourovnicový model zvlášť.

### Výsledné síly působící na talíř zpětné klapky při různých úhlech otevření - metoda k-ε standart



Obr. 5.18 Výsledné síly v závislosti na úhlu otevření talíře zpětné klapky pro model k-ε standard

### Výsledné síly působící na talíř zpětné klapky při různých úhlech otevření - metoda k-ω standart



Obr. 5.19 Výsledné síly v závislosti na úhlu otevření talíře zpětné klapky pro model k-ω standard

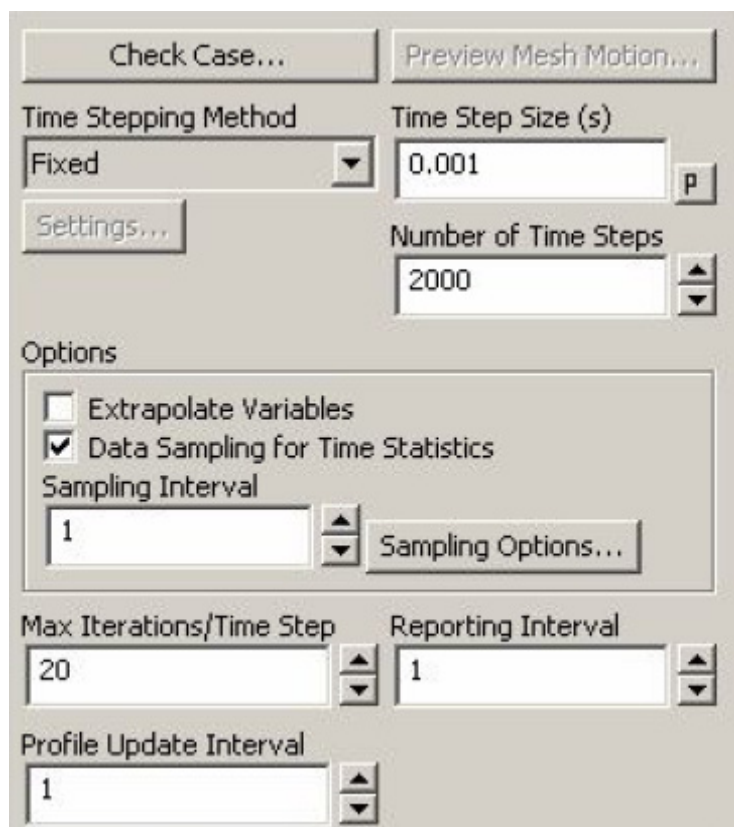
Na první pohled je patrné, že na každém grafu by se dala odvodit určitá polynomická závislost výsledné síly působící na talíř zpětné klapky v závislosti na úhlu otevření. Grafy jsem tedy proložil polynomickou spojnici trendu a dostal jejich rovnici závislosti. Opětovně lze také říci, že podle hodnoty spolehlivosti  $R$  spojnice trendu je opět model  $k-\omega$  o něco přesnější, respektive lze jím lépe proložit spojnice trendu vyšší přesností.

#### 5.4 Porovnání stacionární a časově závislé úlohy

Časově závislá úloha se odlišuje proti stacionární úloze změnou v zadání výpočtu. Jedná se o definici délky časového kroku, počtu časových kroků a počtu vnitřních iterací za časový krok. V mém případě bylo nastavení časově závislé úlohy následující.

- Time step (časový krok) – 0,001 s
- Number of time steps (Počet časových kroků) – 2000
- Maximum iter./Time step (Maximum iterací za jeden časový krok) – 20

Kompletní nastavení časově závislé úlohy je zobrazeno viz obr. 5.20. Časově závislá úloha má proti stacionární úloze jednu výhodu. Díky časovým krokům lze vytvořit animaci proudění za příslušný časový úsek. Pomocí časově závislé úlohy by bylo možné rovněž zachytit případné periodické nestability proudového pole v oblasti za klapkou.



Obr. 5.20 Nastavení výpočtu časově závislé úlohy v program Fluent

Pro porovnání stacionární a časově závislé úlohy jsem si vybral dva úhly otevření talíře klapky. Jednalo se o úhel minimálního otevření talíře klapky, který je v diplomové práci počítán, tedy  $8^\circ$  a dále o maximální úhel otevření talíře klapky, který je rovněž v diplomové práci počítán a jedná se o úhel  $75^\circ$ . Z časových důvodů nebylo možné propočítat všechny úhly otevření talíře klapky, neboť numerický výpočet časově závislé úlohy trvá značně delší dobu, než numerický výpočet stacionární úlohy. Matematický model numerického výpočtu, pro porovnání jsem vybral model k- $\epsilon$  standard s okrajovou vstupní podmínkou Pressure-Inlet a výstupní okrajovou podmínkou Mass-Flow-Inlet. Hodnoty těchto okrajových podmínek zůstaly stejné jako v případě stacionární úlohy.

Numericky vypočtené hodnoty časově závislé úlohy jsem zapsal do tabulek a porovnal s příslušnými hodnotami z úlohy stacionární o stejných parametrech. Vyhodnoceny byly především veličiny totální a statické tlakové ztráty  $\Delta p_{ZTOT}$  a  $\Delta p_{ZSTAT}$ , dále pak síly působící na talíř klapky  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  a jejich výslednice  $F_{xy}$  a  $F_{xyz}$ .

- Porovnání stacionární a časově závislé úlohy pro úhel otevření talíře klapky  $8^\circ$

Úhel otevření talíře klapky - $8^\circ$							
Úloha	$\Delta p_{ZTOT}$ [Pa]	$\Delta p_{ZSTAT}$ [Pa]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F_{xy}$ [N]	$F_{xyz}$ [N]
Stacionární	13235,3	13238,7	462,4	401,5	-1,1	612,4	612,4
Čas. Závislá	13227,3	13232,5	461,9	401,5	-1,1	612,0	612,0

- Porovnání stacionární a časově závislé úlohy pro úhel otevření talíře klapky  $75^\circ$

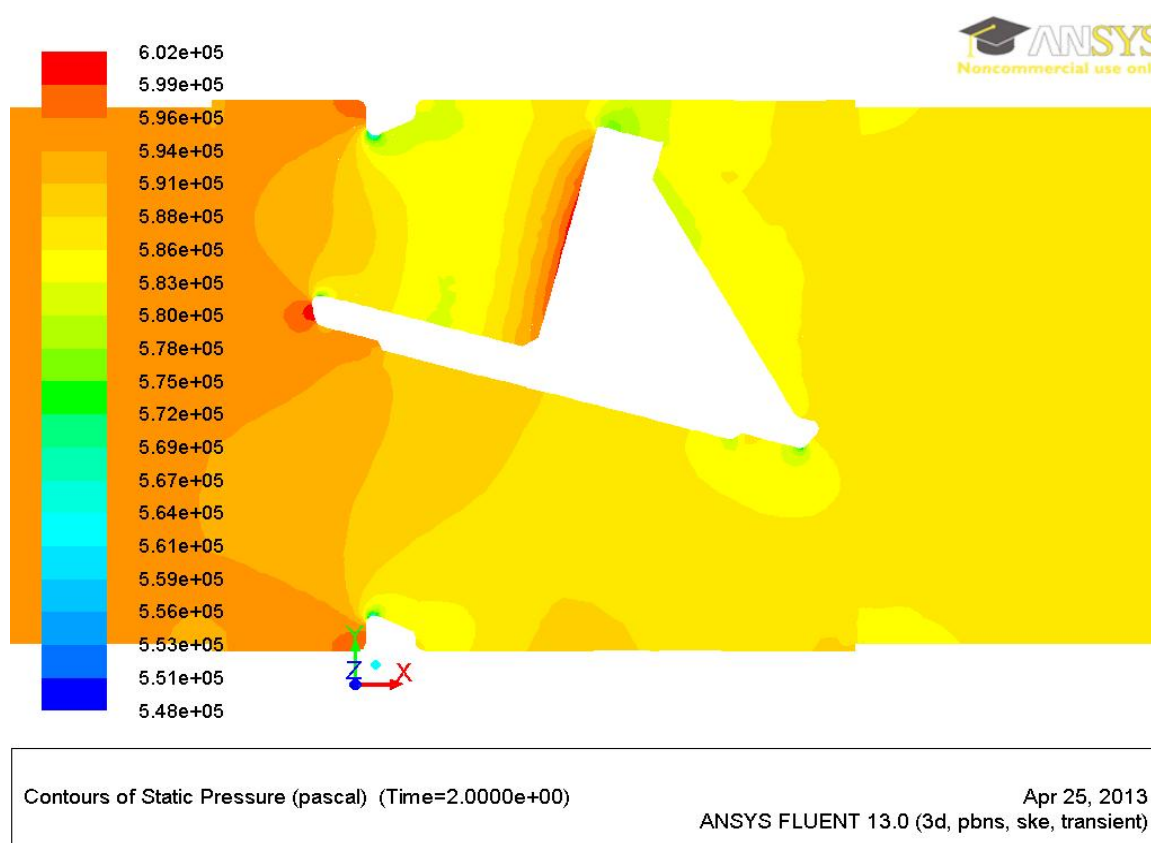
Úhel otevření talíře klapky - $75^\circ$							
Úloha	$\Delta p_{ZTOT}$ [Pa]	$\Delta p_{ZSTAT}$ [Pa]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F_{xy}$ [N]	$F_{xyz}$ [N]
Stacionární	7183,7	7202,9	172,2	485,6	-3,5	515,2	515,2
Čas. Závislá	7185,8	7216,4	172,1	484,1	-3,7	513,8	513,8

Z výsledků numerického výpočtu časově závislé úlohy a jeho porovnání s úlohou stacionární, je patrné, že číselné hodnoty se odlišují jen velmi málo v řádu desetin nebo maximálně v řádu jednotek. Z tohoto důvodu usuzuji, že i v případě použití časově závislé úlohy pro zbylé úhly otevření talíře klapky by výsledky byly stejně přesné jako pro úlohu stacionární.

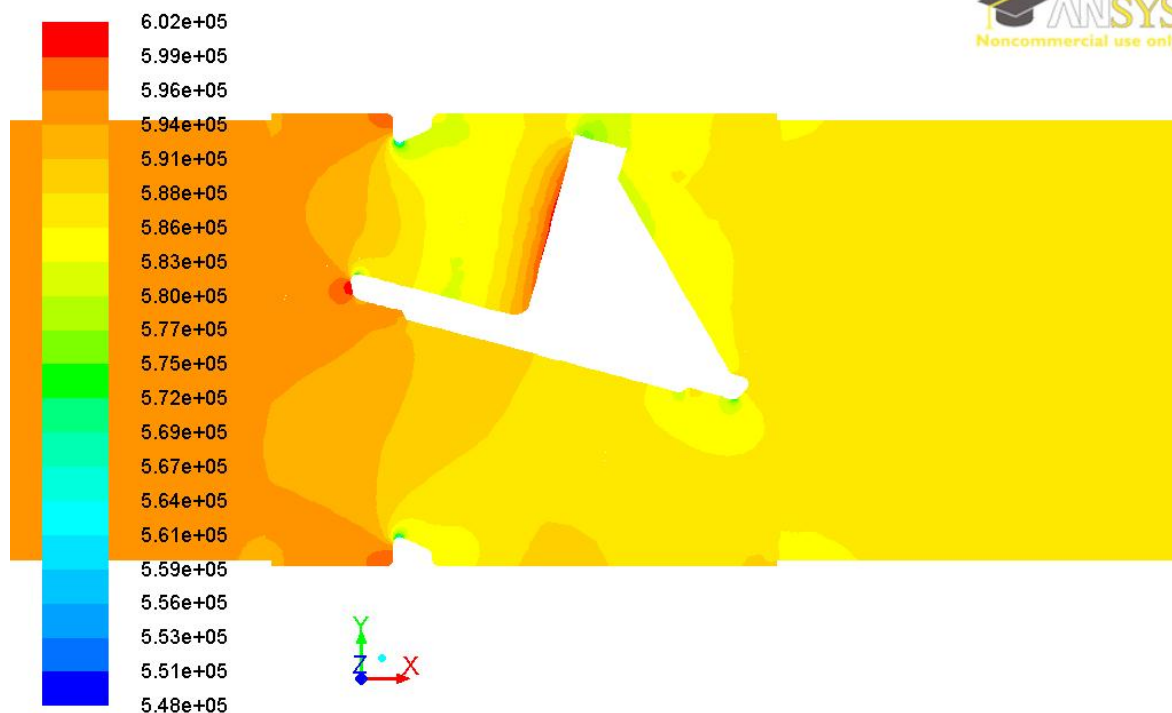
#### 5.4.1. Grafické porovnání stacionární a časově závislé úlohy

Pro grafické porovnání stacionární a časově závislé úlohy jsem si vybral úhel otevření talíře klapky  $75^\circ$ . Z kapacitního důvodu počtu stran diplomové práce jsem se rozhodl, že zde zobrazím jen porovnání detailů kolem talíře zpětné klapky. A to zejména porovnání statického a totální tlaku a rychlosti proudění.

- Grafické porovnání výsledků pro statický tlak



Obr. 5.21 Grafický výsledek časově závislé úlohy pro úhel otevření talíře klapky  $75^\circ$

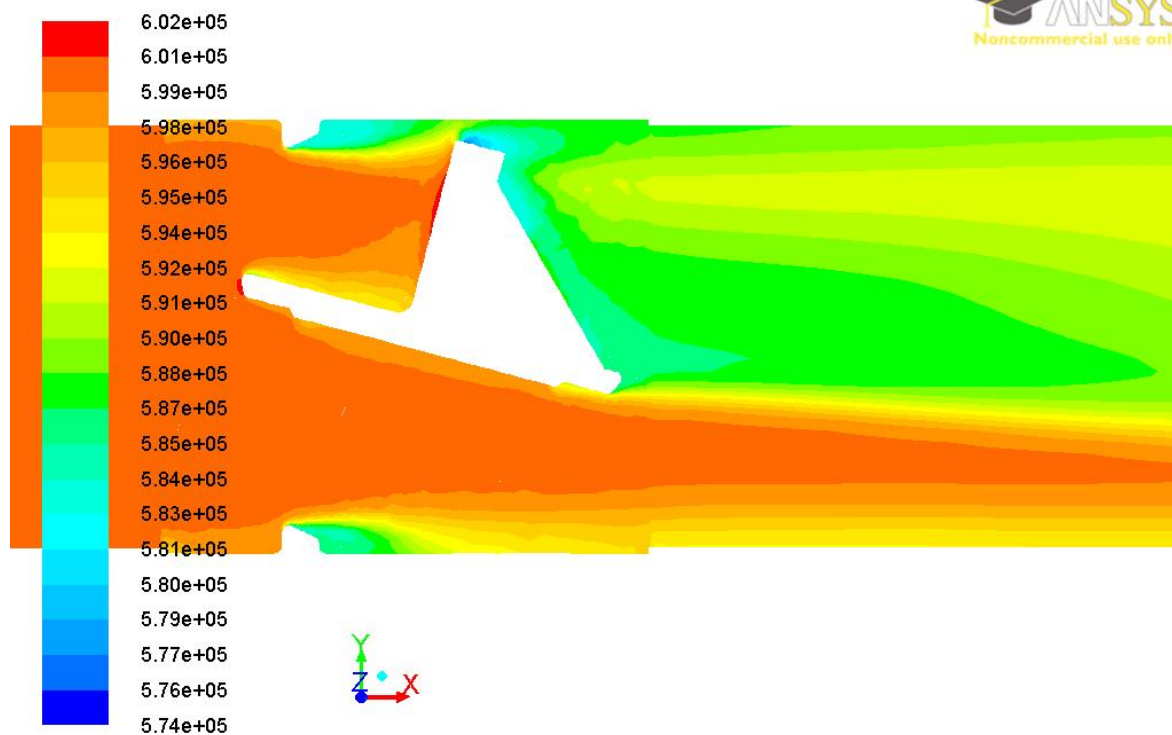


Contours of Static Pressure (pascal)

Apr 08, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske)

**Obr. 5.22 Grafický výsledek stacionární úlohy pro úhel otevření talíře klapky 75°**

- Grafické porovnání výsledků pro totální tlak

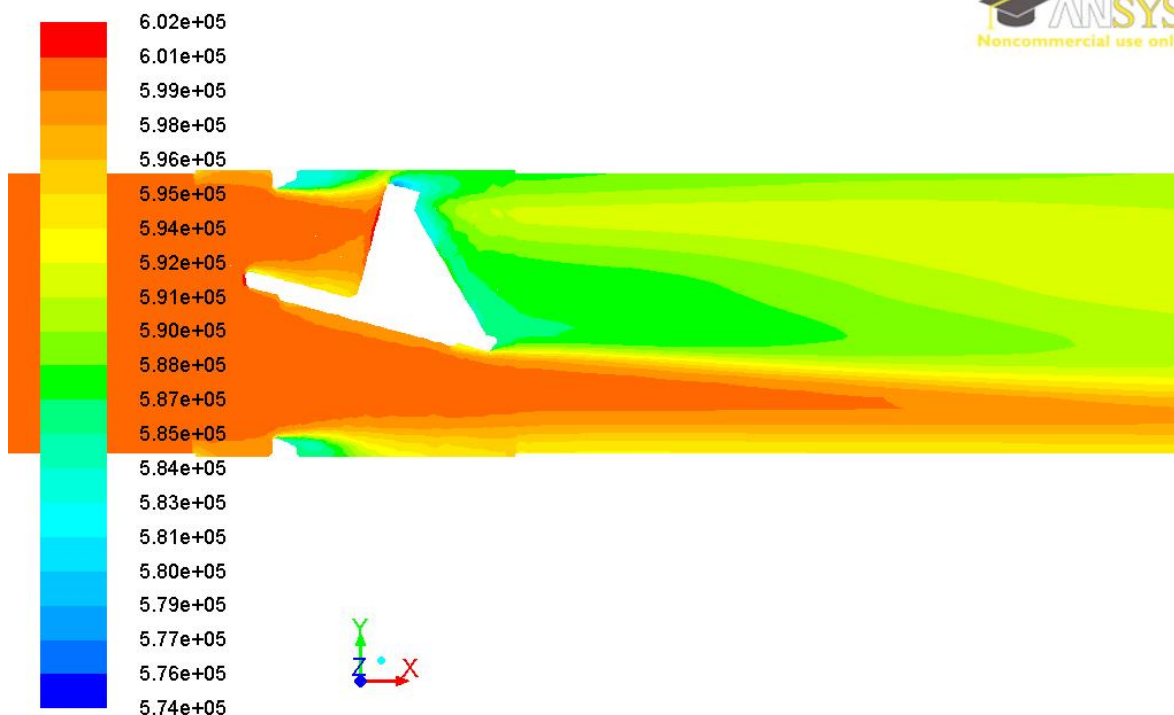


Contours of Total Pressure (pascal) (Time=2.0000e+00)

Apr 25, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske, transient)

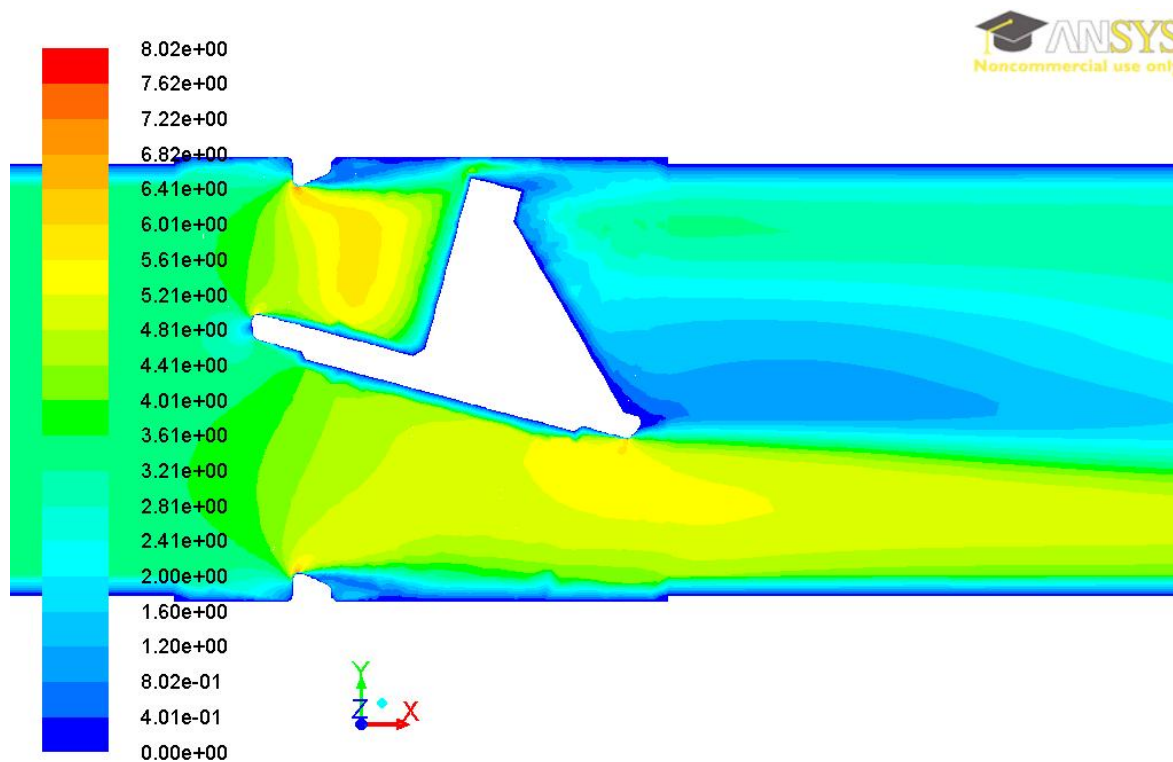
**Obr. 5.23 Grafický výsledek časově závislé úlohy pro úhel otevření talíře klapky 75°**



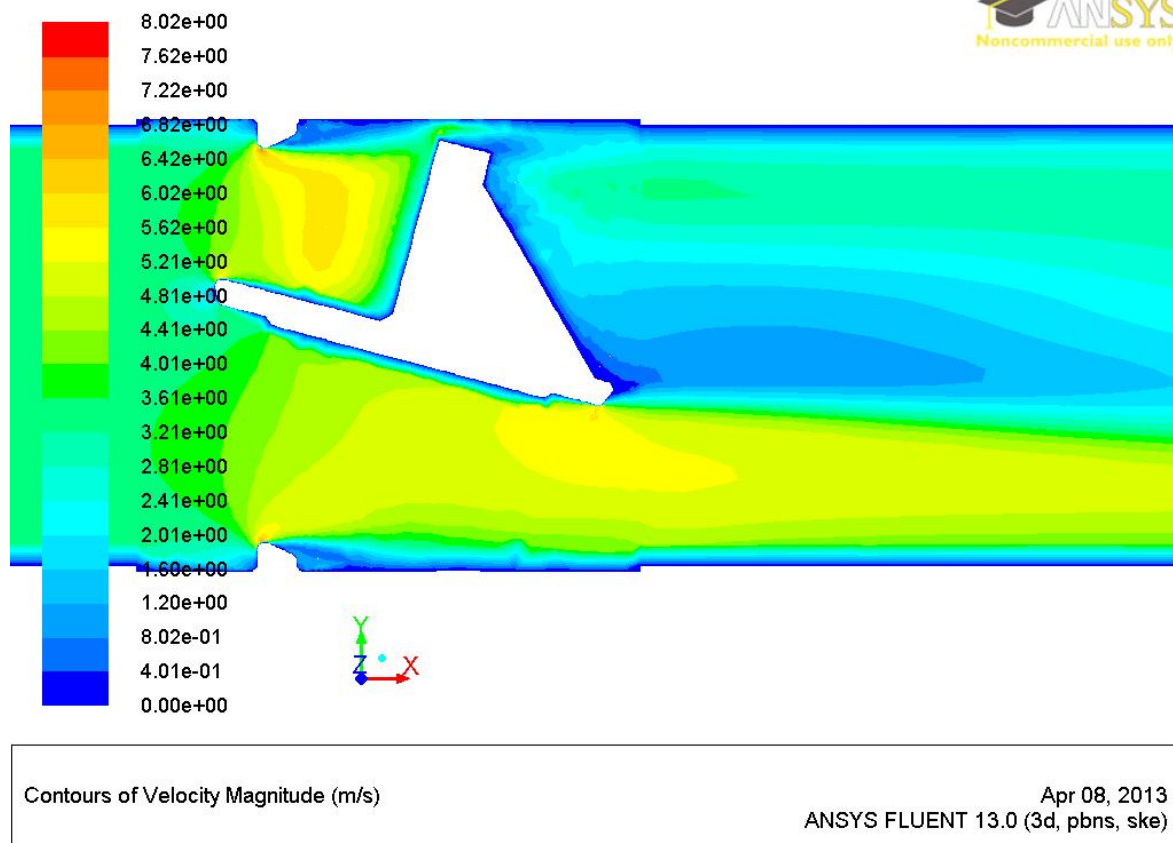


Obr. 5.24 Grafický výsledek stacionární úlohy pro úhel otevření talíře klapky 75°

- Grafické porovnání výsledků pro rychlost proudění



Obr. 5.25 Grafický výsledek časově závislé úlohy pro úhel otevření talíře klapky 75°



**Obr. 5.26 Grafický výsledek stacionární úlohy pro úhel otevření talíře klapky 75°**

Z grafického porovnání časově závislé úlohy a stacionární úlohy je patrné, že grafické výsledky se stejně jako číselné hodnoty odlišují jen velmi málo, ne-li téměř vůbec.

## 5.5 Modelování proudění páry

Tato úloha byla řešena nad rámec zadání diplomové práce s cílem ověřit možnost modelování proudění páry, což je i jedním z dalších bodů spolupráce s firmou Armatury Group. Vzhledem k tomu, že dodaná zpráva o praktickém měření od firmy Armatury Group neobsahovala žádné údaje o proudění páry v dané zpětné klapce, vycházel jsem, z obecných informací, které udává literatura, tj. že rychlost proudění páry by se měla pohybovat okolo 20 až 30 m.s<sup>-1</sup> a teplota páry okolo 400 K. Tyto hodnoty jsem tedy zadal do okrajových podmínek Pressure-Inlet a Mass-Flow-Inlet. Proudění bylo modelováno jako stacionární, stlačitelné, s přenosem tepla. Z tohoto důvodu bylo nutné do modelu zahrnout také rovnici energie, která je formálně podobná předchozím rovnicím a za předpokladu turbulentního proudění je definována takto:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{E}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{E}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\lambda + \lambda_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{d\bar{p}}{dt} + \frac{\partial(\tau_{jk} \bar{u}_j)}{\partial x_k} + \rho \bar{u}_j f_j \quad (5.1)$$

- $\lambda$  je součinitel molekulové teplotní vodivosti
- $\lambda_t$  je součinitel turbulentní teplotní vodivosti
- $E$  je celková energie, která je součtem vnitřní a kinetické energie

$$E = U + \frac{1}{2} \bar{u}_j^2 \quad (5.2)$$

Vybral jsem tedy geometrii zpětné klapky pro úhel otevření talíře klapky  $8^\circ$  a nastavil stejné okrajové parametry jako pro příklad s prouděním vody, tedy okrajové parametry Pressure-Inlet a Mass-Flow-Inlet. Okrajový parametr Pressure-Inlet jsem ponechal nastaven na hodnotě vstupního tlaku 6 bar a přidal vstupní teplotu páry 403 K. Výstupní okrajový parametr Mass-Flow-Inlet jsem musel pozměnit trochu více, neboť dle literatury by se rychlost proudění páry měla pohybovat okolo  $20\text{--}30 \text{ m.s}^{-1}$ . Pokud bych ponechal hmotnostní průtok  $16,65 \text{ kg.s}^{-1}$ , který byl určen pro úlohu s prouděním vody, po přepočtu na parametry páry bych dostal rychlosti proudění za hranicí zvuků, což je nepříjemné. Proto jsem zde zadal hmotnostní průtok pouze  $1 \text{ kg.s}^{-1}$ , který odpovídá rychlosti proudění páry přibližně  $35 \text{ m.s}^{-1}$  na vstupu do modelované oblasti. Maximální rychlost ve štěrbině pod klapkou dosahovala až  $120 \text{ m.s}^{-1}$ . Rovněž i v této okrajové podmínce jsem nastavil teplotu, která byla shodná se vstupní teplotou, tedy 403 K. Pro výpočet byl použit matematický model k- $\epsilon$  standard.

- Numerické porovnání výsledků pro proudění páry a vody

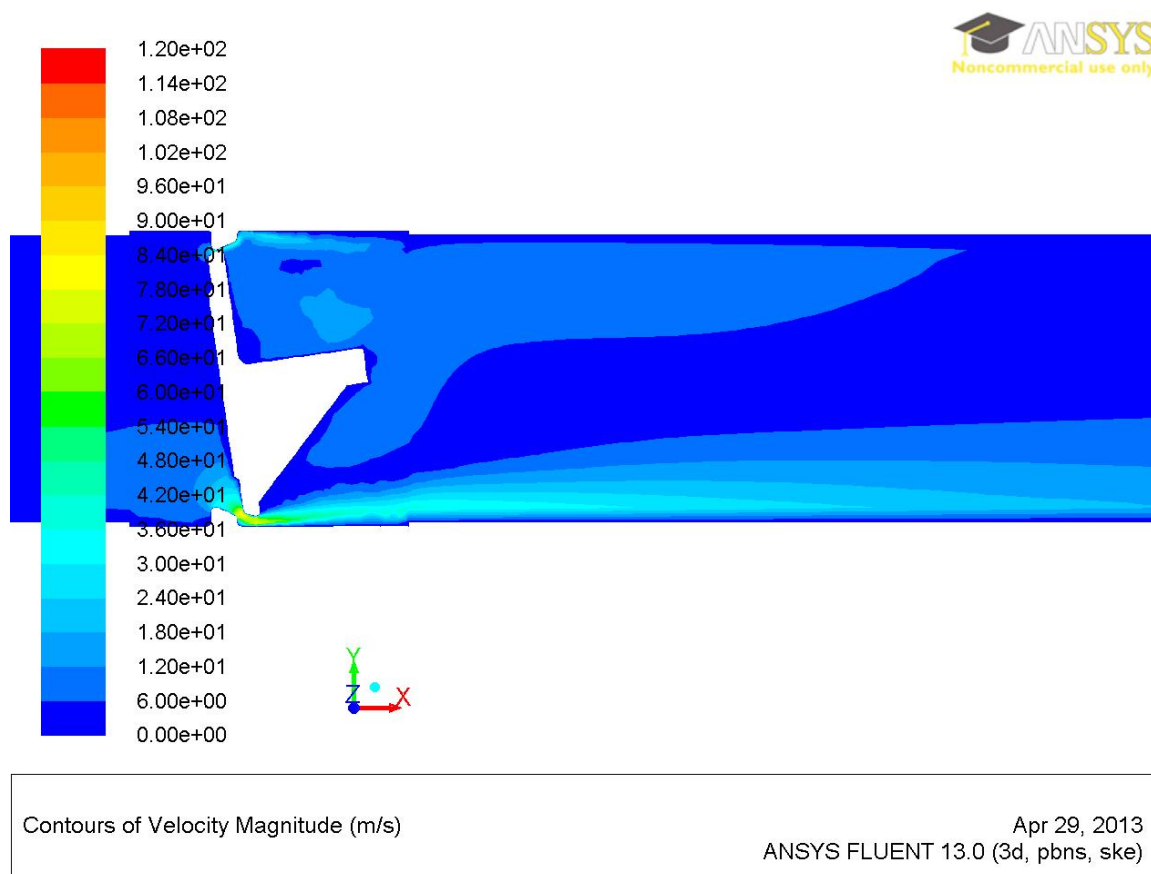
$\alpha = 8^\circ$	Proudící médium	
	Voda	Pára
$\Delta p_{ZTOT} \text{ [Pa]}$	13235,3	13051,5
$\Delta p_{ZSTAT} \text{ [Pa]}$	13238,7	13057,3
$F_x \text{ [N]}$	462,4	456,9
$F_y \text{ [N]}$	401,5	401,0
$F_z \text{ [N]}$	-1,13	-1,1
$F_{xyz} \text{ [N]}$	612,4	607,9
$v_{MAX} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	7,41	120

Pro porovnání číselných výsledku numerického výpočtu jsem vyhodnotil tlakovou ztrátu statického a totálního tlaku a síly působící na talíř zpětné klapky a jejich výslednici.

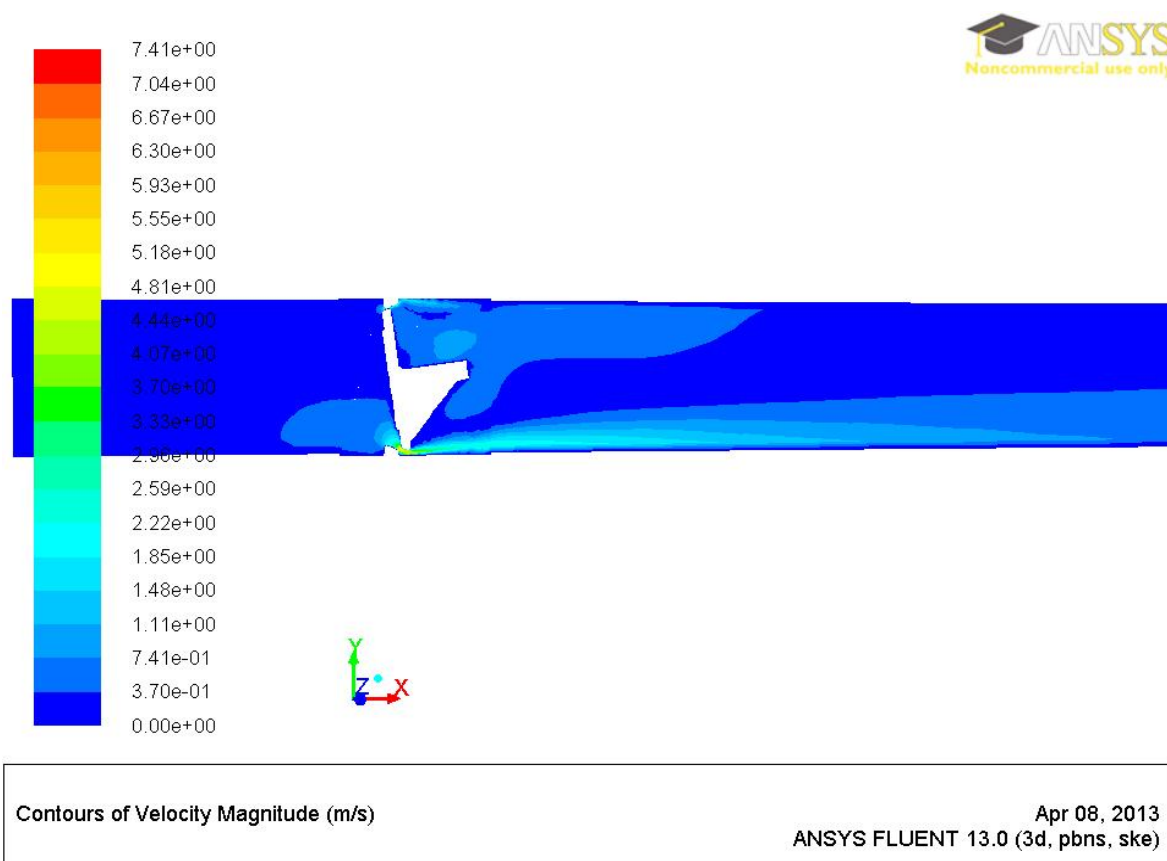
Při porovnání hodnot lze říci, že i přes rozdílné hmotnostní průtoky a rychlosti proudění pro vodu a páru jsou si číselné hodnoty velmi podobné. Jedná se však pouze o jednu variantu výpočtu, tato úloha by vyžadovala další testování i pro jiné hodnoty hmotnostního průtoky a okrajových podmínek

Pro další vyhodnocení jsem použil obrázky grafických výsledků z Fluentu.

- Grafické porovnání výsledků pro rychlost proudění



**Obr. 5.27 Grafický výsledek pro proudění páry při úhlu otevření talíře klapky 8°**



**Obr. 5.28 Grafický výsledek pro proudění vody při úhlu otevření talíře klapky 8°**

- Grafické porovnání výsledků pro statický tlak

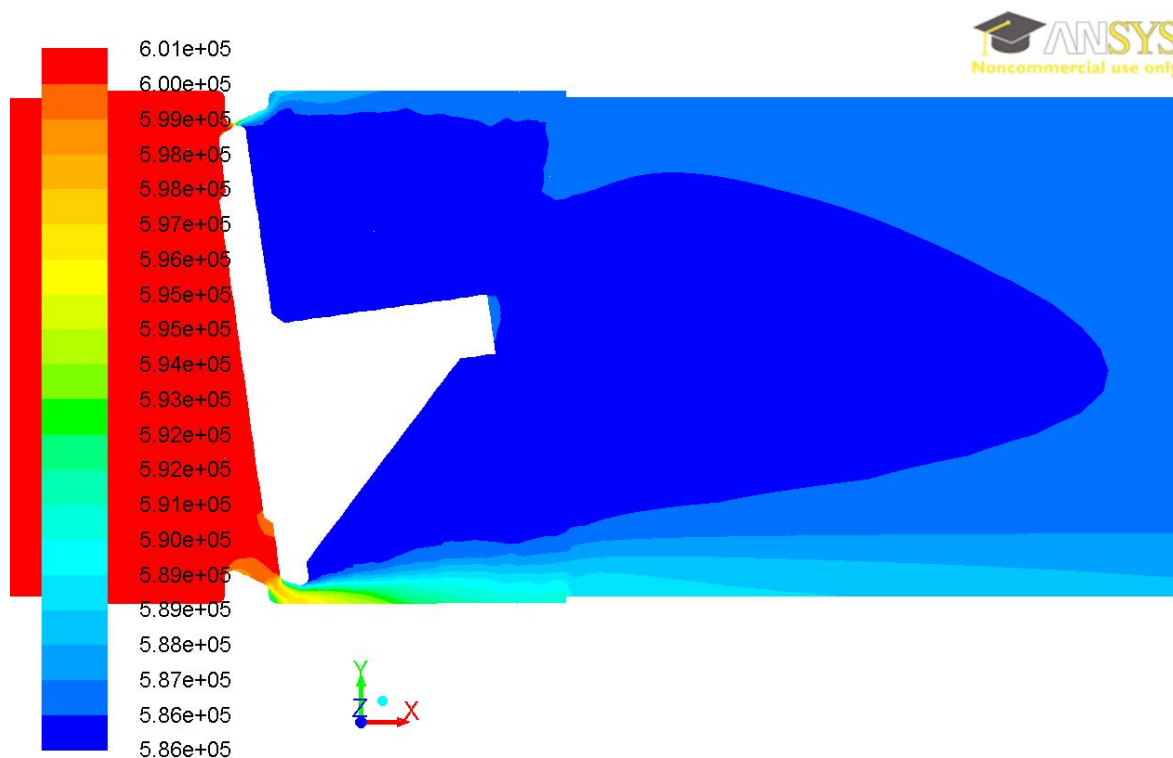


**Obr. 5.29 Grafický výsledek pro proudění páry při úhlu otevření talíře klapky 8°**



**Obr. 5.30 Grafický výsledek pro proudění vody při úhlu otevření talíře klapky 8°**

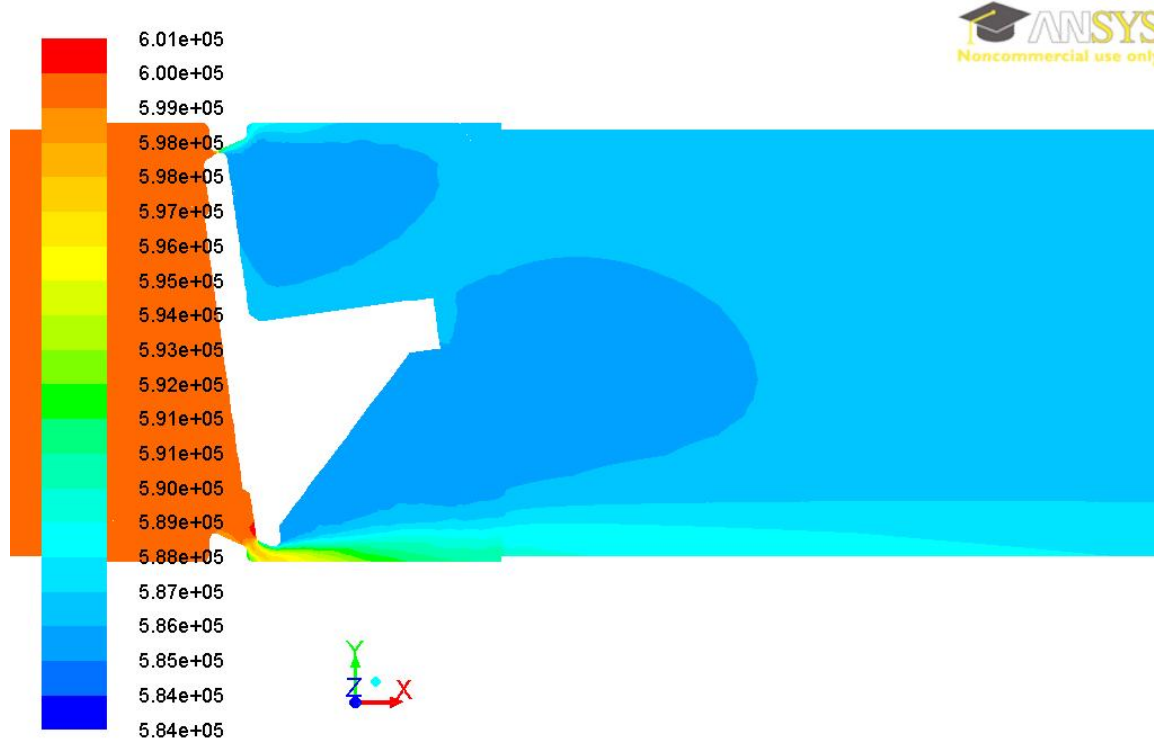
- Grafické porovnání výsledků pro totální tlak



Contours of Total Pressure (pascal)

Apr 29, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske)

**Obr. 5.31 Grafický výsledek pro proudění párv při úhlu otevření talíře klapky 8°**



Contours of Total Pressure (pascal)

Apr 29, 2013  
ANSYS FLUENT 13.0 (3d, pbns, ske)

**Obr. 5.32 Grafický výsledek pro proudění vody při úhlu otevření talíře klapky 8°**

Při vyhodnocení grafických výsledků proudění můžeme vidět, že struktura barevného spektra, kterými jsou obrázky vyhodnoceny je velmi podobná. Ovšem při pohledu na stupnici hodnot je patrné, že každá barva je přiřazena jiné číselné hodnotě. Toto je patrné například u porovnání rychlosti proudění. Nejtmavší tmavě modrá barva značí rychlost proudění  $0 \text{ m.s}^{-1}$  pro vodu i páru, kdežto nejtmavší tmavě červená barva značí hodnotu rychlosti proudění  $7.41 \text{ m.s}^{-1}$  pro vodu a  $120 \text{ m.s}^{-1}$  pro páru. Ostatní barvy zobrazují další rychlosti v daném rozsahu dle příslušného proudícího média. Tato podobnost je také patrná u grafického vyhodnocení pro statický a totální tlak.



## 6. ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ

Cílem diplomové práce bylo numericky modelovat proudění kolem zpětné klapky dle dodané zprávy o praktickém měření od firmy Armatury Group, která obsahovala potřebné datové informace. Modelování bylo provedeno pomocí programu Ansys Fluent, který je obecným CFD kódem a umožňuje řešení celé řady úloh spojených s prouděním.

Dosažené výsledky ovšem vykazovaly určitý rozdíl proti původnímu měření z důvodu řady nepřesností, které už obsahovaly data původního měření a odlišností simulovaných podmínek.

Celkem byly numericky vypočteny a porovnány tři úlohy

- Porovnání praktického měření s numerickým modelováním pro proudění vody a pro úhly otevření talíře klapky 8, 16, 25, 35, 45, 55, 63 a 75°
- Porovnání stacionární a časově závislé úlohy pro proudění vody při úhlech otevření talíře klapky 8 a 75°
- Porovnání proudění vody a páry pro úhel 8°

Porovnávání a vyhodnocení jednotlivých úloh vykazovalo vždy určitou závislost nebo shodu.

V případě porovnání praktického měření s numerickým modelováním pro proudění vody a pro úhly otevření talíře klapky 8, 16, 25, 35, 45, 55, 63 a 75° se jednalo spíše o shodu, která byla prokázána proložením spojnice trendu v každém grafu, který byl sestaven z původních naměřených a vypočtených hodnot. Toto porovnání ovšem nebylo přesné, neboť v dodané zprávě o měření od firmy Armatury Group je uvedeno, že naměřená data mohou mít nepřesnost až  $\pm 16\%$  a zaznamenávání hodnot bylo pořízeno při otevírání a zavírání zpětné klapky, nikoliv při pevné poloze tak jako při numerickém modelování v programu Fluent. Z tohoto důvodu nebylo možné zadat do programu Fluent přesná data a chyby výpočtu se jen znásobily.

Porovnání stacionární a časově závislé úlohy pro proudění vody a pro úhly otevření talíře klapky 8 a 75° bylo poměrně přesné. Tato úloha prokázala, že v tomto případě postačuje stacionární výpočet, který vyžaduje mnohem kratší čas k dosažení konvergence. Proto jedinou výhodou zde vidím to, že v případě časově závislé úlohy máme následnou možnost tvorby animace proudění.

V poslední úloze, která byla spíše doplňkovou úlohou, bylo úkolem modelovat proudění páry. Porovnání s předchozí úlohou proudění vody je velmi složité, neboť nebyla k dispozici žádná původní data z praktického měření pro proudění páry a zadávání vstupních dat do programu Fluent bylo provedeno na základě odhadu podle odborné literatury. Tato úloha by pro dosažení kvalitnějších výsledků potřebovala propočítat více možností.

Celkem bylo numericky vypočteno 35 úloh pro porovnání praktického měření s numerickým modelováním pro proudění vody a pro úhly otevření talíře klapky 8, 16, 25, 35, 45, 55, 63 a 75°, z nichž jsem vybral nejvhodnější okrajové podmínky a výpočetní model. Pro porovnání stacionární a časově závislé úlohy pro proudění vody při úhlech otevření talíře klapky 8 a 75° byly spočteny další dvě časově závislé úlohy. Pro poslední modelování proudění páry byl vypočten pouze jeden příklad.

Časová náročnost výpočtů v případě stacionární úlohy se pohybovala průměrně kolem čtyř až pěti hodin na jeden výpočet. V případě časově závislé úlohy dosahoval čas výpočtů dvou až tří dnů pro jeden výpočet.

Při konečném srovnání výsledků všech úloh bylo zhodnoceno, že dosažené výsledky jsou uspokojivé a splňují předpoklady zadání práce. Úloha nabízí potenciál pro další testování, včetně využití metod adaptace sítě a testování dalších turbulentních modelů.

## **7. SEZNAM PŘÍLOH**

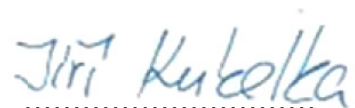
- ❖ DVD s následujícími přílohami
  - Grafické výsledky ostatních úhlů otevření talíře zpětné klapky
  - Zpráva o praktickém měření od firmy Armatury Group (PDF verze)
  - Soubory výpočtů z programu Fluent (Case/Data)
  - Soubory diplomové práce
- ❖ Zpráva o praktickém měření od firmy Armatury Group (tištěná verze)

## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ARMATURY GROUP, *Produktový katalog zpětných klapek*, PDF verze dostupná z WWW:<http://www.armaturygroup.cz/CZ/ke-stazeni/produktove-katalogy/>  
[cit. 2013-01-20]
- [2] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*. Praha: Nakladatelství Informátorku, spol. s.r.o., 2002, 204 s.
- [3] MIKULA, Julius a kol., *Potrubí a armatury*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974, 585 s.
- [4] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury – Teorie a Praxe*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975, 275 s.
- [5] NECKÁŘOVÁ, Jarmila; DOSKOČIL, Ladislav. *Potrubí a armatury*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1978, 170 s.
- [6] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008, 154 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>
- [7] BOJKO, M. *3D Proudění – ANSYS FLUENT (učební text)*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012, 314 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>> [cit. 2013-03-05]
- [8] BOJKO, M. „*Modelování proudění*“ – *FLUENT (Návody do cvičení)*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008, 141 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>  
[cit. 2013-02-24]
- [9] FLUENT, *FLUENT 12 - User's guide Fluent Inc.*  
Dostupné z WWW: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/ug/node1.html>  
[cit. 2012-11-20]
- [10] ARMATURY GROUP, *Produktový katalog uzavíracích a regulačních klapek*,  
PDF verze dostupná WWW: <[http://www.armaturygroup.cz/soubory/Produktove%20katalogy%20CZ %20EN/uzaviraci-a-regulacni-klapky\\_cz+en\\_06\\_2012.pdf](http://www.armaturygroup.cz/soubory/Produktove%20katalogy%20CZ%20EN/uzaviraci-a-regulacni-klapky_cz+en_06_2012.pdf)>  
[cit. 2013-04-08]
- [11] BLEJCHAŘ, T. *Turbulence - Modelování proudění CFX*,. Ostrava: VŠB-TUO, 2010, 263 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>> [cit. 2013-03-20]
- [12] ARMATURY GROUP, *Závěrečná zpráva o měření zpětných klapek DN100 a DN250*, SIGMA Group – Lutín, 2003, 39 s.

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za čas, zájem a připomínky, které věnovala mé diplomové práci. Dále bych chtěl tímto poděkovat také Katedře hydromechaniky a hydraulických zařízení VŠB-TUO za poskytnutí podmínek pro vypracování a vznik této diplomové práce.

Handwritten signature of Jiří Kukelka in blue ink, with a dotted line underneath.

Jiří Kukelka